



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II**

***Polo delle Scienze e delle Tecnologie***

***Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti “Luigi Tocchetti”***

**Dottorato di ricerca in**

**Ingegneria dei Sistemi Idraulici di Trasporto e Territoriali**

**XXI Ciclo**

**Indirizzo “Infrastrutture Viarie e Sistemi di Trasporto”**

**MISURA E CARATTERIZZAZIONE DELLA  
REGOLARITA’ IN AMBITO URBANO, ED IN  
PARTICOLARE PER LE PAVIMENTAZIONI  
LAPIDEE DELLA CITTA’ DI NAPOLI**

**Dottorando: Ing. Andrea Localzo**

**Coordinatore di Dottorato**  
Prof. Ing. Bruno Montella

**Tutore: Prof. Ing. Bruna Festa**

**Coordinatore di Indirizzo**  
Prof. Ing. Renato Lamberti

---

## Indice

CAPITOLO I .....	8
<i>LA TESSITURA E LA REGOLARITA' DEL PIANO VIABILE</i> .....	8
1.1. GENERALITA' .....	8
1.2. DEFINIZIONI DELLE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI .....	8
1.2.1 IRREGOLARITA' .....	10
1.2.2 MEGATESSITURA .....	11
1.2.3 MACROTESSITURA .....	12
1.2.4 MICROTESSITURA .....	13
1.3 RAPPRESENTAZIONE DELLA TESSITURA .....	14
1.4 DEFINIZIONE DI TESSITURA .....	15
1.5 IL PROFILO GEOMETRICO .....	16
1.6 CLASSIFICAZIONE DELLA TESSITURA .....	18
1.7 STRUMENTI PER LA MISURA DELLA TESSITURA .....	27
1.8. I PROFILOMETRI .....	28
1.8.1 PROFILOMETRI LASER .....	33
1.8.2 PROFILOMETRI AD AGO DI CONTATTO .....	34
1.8.3 PROFILOMETRI A SEZIONAMENTO DI LUCE .....	35
1.8.4 PROFILOMETRI AD ULTRASUONI .....	36
CAPITOLO II .....	37
<i>METODI DI RAPPRESENTAZIONE DEL PROFILO E</i> <i>RIELABORAZIONE DEI PROFILI</i> .....	37
2.1 GENERALITA' .....	37
2.2 TECNICHE DI RAPPRESENTAZIONE DEL PROFILO .....	39
2.3 RAPPRESENTAZIONE DIRETTA DEL PROFILO .....	43
2.3.1 FILTRAGGIO DEL PROFILO RILEVATO .....	44
2.3.1.1 FILTRO MEDIA MOBILE .....	45
2.3.1.2 FILTRO ANTI MEDIA MOBILE .....	47
2.3.2 DENSITA' SPETTRALE DI POTENZA DEL PROFILO .....	48
2.3.2.1 SMUSSAMENTO DELLA PSD .....	52
2.3.3 ACCELERAZIONE VERTICALE RELATIVA AL PROFILO .....	54
2.3.4 METODOLOGIE DI TRATTAZIONE DELLE IRREGOLARITA' <i>PUNTUALI</i> .....	57

---

2.3.5	ANALISI DEL PROFILO STRADALE TRAMITE L'ACCELERAZIONE SPAZIALE .....	61
2.4	PARAMETRI DESCRITTIVI RAPPRESENTATIVI DEL PROFILO: INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX .....	65
2.4.1	MODELLO DEL QUARTO DI VEICOLO .....	66
2.4.2	PROBLEMATICHE NEL CALCOLO DELL'IRI .....	68
2.4.3	CALCOLO DELL'IRI .....	71
2.5	RIDE NUMBER (RN) .....	71
2.6	ALTRI PARAMETRI SINTETICI DELLA REGOLARITA' SUPERFICIALE .....	74
2.7	METODI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI OMOGENEE...	75
2.7.1	METODI GRAFICO-STATISTICI: CDA E CUMSUM .....	77
2.7.2	METODI LINEARI.....	80
2.7.2.1	AGGREGAZIONE DI TRATTE ELEMENTARI.....	80
2.7.2.2	METODO DICOTOMICO.....	84
2.7.2.3	METODO BAYESIANO.....	89
2.7.3	METODO ECONOMETRICO NON LINEARE .....	93
2.7.4	ALTRI METODI PRESENTI IN LETTERATURA.....	102
	CAPITOLO III .....	106
	LE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE, CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI .....	106
3.1.	PREMESSA.....	106
3.2	PAVIMENTAZIONI LAPIDEE TRADIZIONALI.....	107
3.2.1	L'ACCIOTTOLATO.....	107
3.2.2	IL SELCIATO .....	112
3.2.3	IL LASTRICATO .....	125
3.2.4	MASSELLI AUTOBLOCCANTI IN CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA.....	129
3.2.4.1	LE ESPERIENZE STRANIERE.....	133
3.2.4.2	LE ESPERIENZE ITALIANE .....	134
3.2.4.3	METODI DI DIMENSIONAMENTO .....	136
3.2.4.4	I METODI DI COSTRUZIONE .....	137
3.2.4.5	PROSPETTIVE PER LE PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO NELLA VIABILITÀ URBANA IN ITALIA .....	140
3.3	MATERIALI LAPIDEI IMPIEGATI NELLE PAVIMENTAZIONI .....	141

---

3.3.1 ROCCE IGNEE O MAGMATICHE .....	142
3.3.1.1 PORFIDI.....	143
3.3.1.2 GRANITI.....	146
3.3.1.3 LAVA DEL VESUVIO.....	147
3.3.1.4 BASALTO.....	148
3.3.2 TRAVERTINI.....	149
3.3.3 PIETRE .....	149
3.3.4 PREZZI .....	150
3.4 PROBLEMATICHE RELATIVE ALLE PAVIMENTAZIONI IN PIETRA .....	152
3.4.1 PERDITA DI REGOLARITA' .....	152
3.4.2 PRINCIPALI TIPOLOGIE DI DISSESTI RELATIVI ALLE PAVIMENTAZIONI IN ELEMENTI LAPIDEI .....	153
3.4.3 PERICOLOSITA' DELLA MARCIA DEI VEICOLI A DUE RUOTE .....	158
3.4.4 VIBRAZIONI INDOTTE DAL TRAFFICO VEICOLARE.....	159
3.4.5 IL PROBLEMA DELL'ADERENZA.....	164
3.4.6 PORTANZA DEL SOTTOFONDO.....	164
3.4.7 SIGGILLATURA DEI GIUNTI DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE .....	166
3.4.7.1 SABBIE PER IL RIEMPIMENTO DEI GIUNTI. ....	168
3.4.7.2 PROVE DI LABORATORIO.....	170
3.4.7.3 PROVE DI LABORATORIO IN VERA GRANDEZZA .....	171
3.4.7.4 PROVE IN SITO.....	173
CAPITOLO IV.....	177
<i>CENSIMENTO DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE PRESENTI A NAPOLI E PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DEGRADI DELLE PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO ED IN CUBETTI.....</i>	177
4.1. GENERALITA' .....	177
4.2. CENSIMENTO PAVIMENTAZIONI LAPIDEE NAPOLETANE QUARTIERE PER QUARTIERE.....	178
4.3. PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DISSESTI DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE.....	194
4.3.1 PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DEGRADI DELLE PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO.....	196



---

4.3.2	PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DEGRADI DELLE PAVIMENTAZIONI IN CUBETTI.....	198
	CAPITOLO V .....	200
	<i>PROGRAMMAZIONE CAMPAGNA DI PROVE E COSTRUZIONE DATA BASE DI PROFILI.....</i>	<i>200</i>
5.1	DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA DI PROVE .....	200
5.2	DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA IMPIEGATA PER L'ACQUISIZIONE DEI PROFILI .....	201
5.3	PROBLEMATICHE NELLA MISURAZIONE DEI PROFILI E TRATTAZIONE PRELIMINARE DEI DATI .....	207
	CAPITOLO VI.....	211
	<i>ELABORAZIONE ED ANALISI DEI PROFILI RILEVATI .....</i>	<i>211</i>
6.1	PREMESSA.....	211
6.2	MODELLO DESCRITTIVO/INTERPRETATIVO DELLA REGOLARITA' DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE .....	214
6.2.1	ELIMINAZIONE DELLE IRREGOLARITA' PUNTUALI.....	216
6.2.2	INDIVIDUAZIONE DELLE TRATTE OMOGENEE E VERIFICA DI STAZIONARIETA' .....	220
6.2.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO .....	225
6.3	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO SU PROFILI DI PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO .....	228
6.3.1	ULTERIORI VERIFICHE DI VALIDITA' DEL MODELLO PROPOSTO .....	237
6.4	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO SU PROFILI DI PAVIMENTAZIONI IN CUBETTI .....	240
6.5	PROBLEMATICHE DEL FUORI SCALA E RICOSTRUZIONE ARTIFICIALE DEI PROFILI TAGLIATI .....	246
6.5.1	PRIMO METODO DI SIMULAZIONE DI IRREGOLARITA' AD ALTA FREQUENZA .....	248
6.5.2	SECONDO METODO DI SIMULAZIONE DI IRREGOLARITA' AD ALTA FREQUENZA.....	252
6.5.3	APPLICAZIONE DEL MODELLO AI PROFILI RICOSTRUITI	254
	CAPITOLO VII .....	257
	<i>APPLICAZIONI.....</i>	<i>257</i>

---

7.1 CALCOLO DELLE PSD DELLE SOTTO TRATTE STAZIONARIE ....	257
7.1.1 PROPOSTA DI MODIFICA ALL'ALGORITMO DI CALCOLO DELLA PSD SMOOTHED DELLA NORMA ISO 8608.....	260
7.2 CLASSIFICAZIONE SPETTRALE DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE.....	271
7.2.1 CLASSIFICAZIONE SPETTRALE DELLE PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO.....	271
7.2.2 CLASSIFICAZIONE SPETTRALE DELLE PAVIMENTAZIONI IN CUBETTI.....	277
7.3 CONFRONTI SPETTRALI TRA PAVIMENTAZIONI LAPIDEE IN CUBETTI ED IN LASTRICATO.....	282
7.4 VARIABILITA' TRASVERSALE DEI PROFILI LONGITUDINALI ....	286
7.5 GENERAZIONE ARTIFICIALE DI PROFILI DI PAVIMENTAZIONI LAPIDEE.....	288
7.6 CONSIDERAZIONI SUL COMFORT DI MARCIA SU PAVIMENTAZIONI LAPIDEE.....	291
7.7 PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA A BASSO COSTO PER LA RAPPRESENTAZIONE DELLA REGOLARITA' .....	295
CONCLUSIONI.....	303
BIBLIOGRAFIA .....	311
APPENDICE A .....	317
<i>RICHIAMI DI ANALISI ARMONICA E TEORIA DEI SEGNALI</i> .....	317
A.1 PREMESSA .....	317
A.2 CLASSIFICAZIONE FENOMENOLOGICA DEI SEGNALI .....	318
A.3 CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI DETERMINISTICI .....	320
A.3.1 SEGNALI PERIODICI SINUSOIDALI .....	321
A.3.2 SEGNALI QUASI PERIODICI .....	322
A.3.3 SEGNALI PERIODICI COMPLESSI .....	327
A.3.4 SEGNALI NON PERIODICI TRANSITORI.....	328
A.4 TEOREMA DELLA CONVOLUZIONE .....	331
A.5 CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALI ALEATORI.....	332
A.5.1 SEGNALI ALEATORI STAZIONARI.....	333
A.5.2 SEGNALI ALEATORI ERGODICI.....	334
A.6 PROCESSI STOCASTICI .....	335
A.6.1 CLASSIFICAZIONE DEI PROCESSI STOCASTICI .....	336

---

<b>A.6.2 PARAMETRI DESCRITTIVI DELLE CARATTERISTICHE DI UN PROCESSO ALEATORIO .....</b>	<b>338</b>
<i>A.6.2.1 FUNZIONE AUTOCORRELAZIONE .....</i>	<i>339</i>
<i>A.6.2.2 FUNZIONE CROSSCORRELAZIONE .....</i>	<i>340</i>
<i>A.6.2.3 FUNZIONE DENSITA' SPETTRALE DI POTENZA .....</i>	<i>341</i>
<i>A.6.2.4 FUNZIONE CROSS-SPETTRO.....</i>	<i>345</i>
<b>A.7 DIGITALIZZAZIONE DEI SEGNALI.....</b>	<b>345</b>
<b>A.7.1 CONTENUTO IN FREQUENZA DI UN SEGNALE DIGITALE .</b>	<b>350</b>
<i>A.7.1.1 TRASFORMATTA DISCRETA DI FOURIER.....</i>	<i>350</i>
<i>A.7.2 PROBLEMATICHE DI TRATTAZIONE DEI SEGNALI DIGITALI.</i>	<i>352</i>
<b>APPENDICE B .....</b>	<b>358</b>
<i>TABELLE CON LA TIPOLOGIA DI PAVIMENTAZIONE SUDDIVISE PER QUARTIERE.....</i>	<i>358</i>
<b>BIBLIOGRAFIA APPENDICE A .....</b>	<b>376</b>

---

# CAPITOLO I

## ***LA TESSITURA E LA REGOLARITA' DEL PIANO VIABILE***

### **1.1. GENERALITA'**

Per avere una pavimentazione che abbia un'ottima funzionalità dobbiamo poter assicurare i requisiti di *Portanza*, *Regolarità*, *Rugosità (Aderenza)* e *Rumorosità* [1]. Delle presenti caratteristiche le ultime tre sono legate a degradazioni superficiali della sovrastruttura caratterizzate da ondulazioni longitudinali e trasversali, avvallamenti, ingobbimenti, fessurazioni, ormaimenti, nonché da alterazioni della micro e della macrorugosità e della tessitura geometrica [2]. Le caratteristiche Regolarità e Rugosità sono strettamente connesse alla tessitura del piano viario che è anche la causa che origina vibrazioni e rumorosità. Quindi, in un'ottica di manutenzione, il rilievo ed il monitoraggio degli indicatori della tessitura assumono una sostanziale importanza, pur se non esaustiva, per creare i presupposti per un'interazione ottimale tra pneumatico e piano viario che si avvicini quanto più è possibile al "puro rotolamento" [3],[4].

La tessitura è inoltre un presupposto fondamentale per garantire l'aderenza, e quindi la sicurezza, per garantire la capacità drenante, la resistenza al rotolamento, il comfort acustico e vibratorio e per la riduzione dei costi di trasporto, tutti aspetti che rappresentano, attualmente, requisiti indispensabili di un'infrastruttura viaria.

### **1.2. DEFINIZIONI DELLE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI**

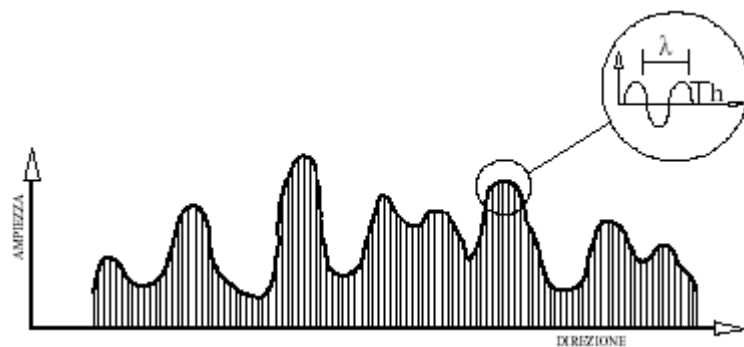
Una definizione di tessitura è fornita dalla norma ISO 13473-1 che indica come tessitura di una pavimentazione stradale "*la deviazione della superficie reale da un piano di riferimento*" [5]; tale deviazione è dovuta alla scabrezza superficiale degli elementi ed alla loro disposizione spaziale caotica. Per meglio approfondire tale aspetto possiamo far riferimento a tre fattori [6] :

- La disposizione spaziale dei singoli elementi;

- Le diverse dimensioni degli elementi stessi;
- La scabrezza superficiale degli inerti ottenuti generalmente per frantumazione.

Le dimensioni dei diversi elementi lapidei e la presenza di vuoti superficiali forniscono sollecitazioni all'autoveicolo, e di conseguenza agli occupanti, pregiudicando il comfort di marcia, la sicurezza ed il consumo energetico [6].

Immaginando di rappresentare in un piano l'intersezione della superficie stradale con un piano verticale, si ottiene il profilo della superficie stradale nella direzione considerata (Fig.1.1). Attraverso l'analisi di Fourier, il profilo così ottenuto può essere rappresentato dalla sovrapposizione continua di tante curve sinusoidali caratterizzate ciascuna da lunghezza d'onda  $\lambda$  e ampiezza  $h$  diverse, così da poter distinguere meglio gli effetti legati ai diversi aspetti della rugosità.



**Figura 1.1** – Profilo della superficie stradale e tessitura come sovrapposizione di onde.

Proprio in base alla suddetta schematizzazione, nel corso del XVIII Congresso Mondiale di Strade (Bruxelles, 1987), il Comitato Tecnico delle Caratteristiche Superficiali dell'AIPCR ha proposto, come verrà meglio esposto in seguito, la classificazione delle caratteristiche geometriche superficiali della pavimentazione stradale riportata nella tabella seguente:

DOMINIO	INTERVALLO DI DIMENSIONI	
	ORIZZONTALE	VERTICALE
MICROTESSITURA	0 - 0.5 mm	0 - 0.2 mm
MACROTESSITURA	0.5 - 50 mm	0.2 - 10 mm
MEGATESSITURA	50 - 500 mm	1 - 50 mm
REGOLARITA' SUPERFICIALE		
ONDE CORTE	0.5 - 5 m	1 - 20 mm
ONDE MEDIE	5 - 15 m	5 - 50 mm
ONDE LUNGHE	15 - 50 m	10 - 200 mm

E' dunque possibile suddividere la tessitura della pavimentazione stradale in quattro classi riportate in ordine decrescente di grandezza [7], [8]:

- Irregolarità;
- Megatessitura;
- Macrotesitura;
- Microtesitura.

I campi della microtesitura e macrotesitura sono quelli che maggiormente influenzano l'aderenza, per tale motivo questi sono associati al concetto di rugosità di una pavimentazione, quale attitudine della stessa a fornire, in ogni condizione atmosferica e di guida, adeguata aderenza al contatto pneumatico-strada.

### 1.2.1 IRREGOLARITA'

Le *irregolarità* sono i difetti della pavimentazione con dimensioni caratteristiche comprese tra 0,50 m e 50 m [5] che influiscono soprattutto sul comfort di guida, inducendo sollecitazioni verticali anomale sul veicolo che possono provocare perdite di aderenza se non, addirittura, la perdita del contatto tra veicolo e pavimentazione compromettendo la sicurezza. A questa categoria appartengono non solo le irregolarità in direzione longitudinale ma anche quelle in direzione trasversale al profilo stradale quali le *ormaie* che spesso impediscono l'ordinario deflusso delle acque meteoriche determinando l'accumulo di sacche idriche particolarmente insidiose nel moto ad alta velocità [6]. Inoltre la presenza delle irregolarità superficiali favorisce un accelerato

---

fenomeno di degrado della sovrastruttura, ciò è dovuto al fatto che i carichi presenti su una pavimentazione irregolare si ripartiscono in modo disomogeneo con incrementi localizzati in alcuni punti che tendono a degradarsi anticipatamente. Le irregolarità possono generarsi per carenze strutturali determinate da errori progettuali oppure possono essere causate dal confezionamento della sovrastruttura con materiali scadenti o, comunque, con requisiti di resistenza meccanica minori di quelli necessari per la realizzazione dell'opera oppure ad errate lavorazioni di costipamento e di messa in opera dei materiali.

### **1.2.2 MEGATESSITURA**

La *megatessitura* è la classe di tessitura compresa tra i 50 mm ed i 500 mm ovvero di quelle dimensioni assimilabili a quelle della zona di contatto tra pneumatico e pavimentazione. La megatessitura non influisce sensibilmente sull'aderenza ma le degradazioni che ne scaturiscono possono far nascere, o meglio amplificare, problemi legati alle vibrazioni degli organi di guida del veicolo compromettendo il comfort e la sicurezza di marcia. Oltre a questi effetti la presenza della megatessitura può dar luogo anche a rumore di rotolamento e ad un maggior logorio dei pneumatici nonché all'accumulo di acqua sulla carreggiata [9]. Si tratta di una caratteristica legata ad eterogeneità delle miscele e alle modalità di messa in opera [10].

La sua presenza è dovuta essenzialmente alla varietà dei materiali posti in opera negli strati superficiali, che possono avere caratteristiche dimensionali e di resistenza all'abrasione molto diverse.

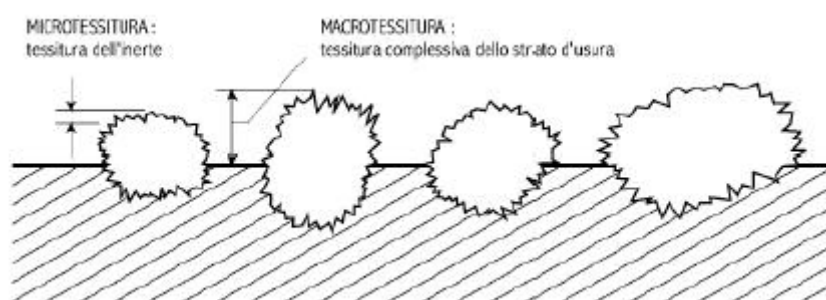
La megatessitura può presentarsi sotto forma di degradazioni del rivestimento: fessurazioni a "pelle di coccodrillo", piccole buche, desquamazioni, striature, ecc.[11].

Essa spesso può presentarsi, anche nel caso di strati superficiali in buono stato o di moderna realizzazione, come sottoprodotto del processo di ottenimento della macrotessitura: una spanditura doppia di ghiaietto, un conglomerato bituminoso o cementizio non ben dosato, possono offrire ai pneumatici una superficie di contatto irregolare dovuta ad una mancanza di omogeneità della macrotessitura.

---

### 1.2.3 MACROTESSITURA

La *macroteessitura* si riferisce al campo metrico compreso tra 0,5 mm e 50 mm con ampiezze tra 0,2 mm e 10 mm, è la rugosità dovuta all'insieme delle asperità intergranulari ed è dovuta alla forma, alla dimensione ed al posizionamento degli elementi lapidei che affiorano dal conglomerato; nel caso di pavimentazioni in calcestruzzo essa è costituita anche dalla forma, dalla profondità, dal distanziamento, dalla larghezza, dalla simmetria e dalla direzione di eventuali striature [6].



**Figura 1.2** - Definizione di micro e macroteessitura

Tale classe di tessitura è collegata anche alla modalità di posa in opera ed alla composizione della miscela e la sua durevolezza nel tempo deriva dalle caratteristiche mineralogiche delle rocce di provenienza degli inerti [9].

Il battistrada del pneumatico, in corrispondenza degli effettivi punti di contatto con il manto stradale, viene leggermente deformato dalle macro asperità superficiali, per entità dell'ordine di 0,2 –0,4 mm; quindi la macroteessitura è la causa principale delle deformazioni per isteresi della gomma dei pneumatici e del conseguente sviluppo di forze orizzontali di reazione che si oppongono allo slittamento delle ruote [10].

La macroteessitura è considerata ottimale [10], dal punto di vista della resistenza allo slittamento, se la sua altezza è nell'intervallo 0.7-1.2 mm e la distanza media tra le punte delle particelle di conglomerato variano tra 6.5 e 12 mm (Babkov, 1985).

In sintesi, la macroteessitura identifica la rugosità della pavimentazione che determina le condizioni di drenaggio superficiale, la deformazione del battistrada, l'aderenza alle alte velocità ed infine le proprietà acustiche [9].

A velocità elevate, poiché diventa sempre più difficile penetrare il film d'acqua nel tempo disponibile, l'aderenza dipende largamente dalla componente di deformazione e



---

le asperità devono essere sufficientemente grandi da deformare il pneumatico anche in presenza di uno strato d'acqua.

La presenza delle asperità si rivela, quindi, una caratteristica indispensabile per la sicurezza alle alte velocità [12] e su manto bagnato [13] in quanto superficialmente alla pavimentazione si forma una rete più o meno fitta e continua di canali che, congiuntamente alla pendenza trasversale della piattaforma viaria, consente lo smaltimento delle acque meteoriche, ottimizzando così il contatto tra pneumatico e pavimentazione. Un buon drenaggio determina inoltre una riduzione di spruzzi e nubi d'acqua (fenomeno splash and spray) intorno ai pneumatici ed il miglioramento delle qualità ottiche dei manti, riducendo il fenomeno della riflessione [14].

I principali costi di utenza influenzati dalla macrotestitura sono la resistenza al rotolamento (influenzando i costi di carburante), incidenti (a velocità medio-alte, cioè 70 km/h e oltre, ed è influenzata da visibilità ridotta) e il rumore pneumatico-strada [14]. Questa classe di tessitura, è stata finora la più semplice da testare con l'impiego ad esempio del metodo dell'altezza in sabbia con il quale si evince il noto indicatore HS che si riferisce alla "profondità media di tessitura" [15].

## **1.2.4 MICROTESSITURA**

La microtestitura, è il campo della tessitura a cui si attribuisce soltanto un limite dimensionale superiore, fissato in lunghezze d'onda minori di 0,5 mm, e ampiezze del profilo che vanno da 1  $\mu\text{m}$  a 0,2 mm, e rappresenta la rugosità dovuta alla scabrezza e ruvidezza dei singoli elementi lapidei impiegati nello strato superficiale della pavimentazione [10], [6].

La scabrezza è generata dalle micro asperità presenti sulla superficie visibile degli inerti sporgenti in superficie e dipende sia dalla natura petrografica e mineralogica degli elementi, sia dalla resistenza alla frantumazione delle rocce, da cui gli stessi hanno avuto origine e quindi dalla spigolosità del pezzo frantumato; per alcune miscele come il calcestruzzo di cemento ed il conglomerato bituminoso, essa dipende anche dalla rugosità della malta. La microtestitura è una grandezza sensibile alle azioni del traffico, degli agenti atmosferici e del tempo e la sua persistenza dipende dalla resistenza alla levigabilità degli inerti [16]. Alla microtestitura sono associati essenzialmente effetti sull'aderenza alle basse velocità e sul consumo dei pneumatici [9]. Il ruolo principale

---

esercitato da questa caratteristica di tessitura sulle prestazioni di aderenza consiste nel penetrare la gomma del battistrada, producendo localmente pressioni di contatto molto elevate ed una vera e propria forza di attrito radente. In presenza di superfici di contatto bagnate, l'intervento delle micro asperità assicura la rottura del film d'acqua che si interpone tra pneumatico e strada, permettendo il conseguente contatto "asciutto" all'interfaccia [17].

E' dunque possibile affermare che mentre la macrotessitura determina gli aspetti quantitativi del contatto fra gomma ed inerti, la microtessitura influisce invece soprattutto sulla qualità dello stesso. La presenza della microtessitura, se da un lato risulta assolutamente necessaria ai fini dell'aderenza, dall'altro è una delle principali cause dell'usura dei pneumatici [9]. Prima dell'impiego dei moderni sistemi ottici, la misura diretta della microtessitura poteva essere effettuata soltanto in laboratorio con sistemi del tipo a sonda o attraverso analisi al microscopio.

### **1.3 RAPPRESENTAZIONE DELLA TESSITURA**

L'analisi della geometria della superficie di una pavimentazione stradale si presenta notevolmente complessa ed articolata; ciò può ascriversi a più motivazioni, connesse con molteplici e diversi fattori [18]. La difficoltà principale che si riscontra nella modellazione della superficie reale scaturisce dalla struttura intrinseca della stessa e quindi dalla natura composita della miscela (elementi di dimensioni marcatamente differenti) e, non da ultimo, dai difetti del piano viabile legati ai processi di stesa e costipamento, caratterizzati da evidente imprecisione esecutiva [6].

Come si vedrà più diffusamente in un apposito capitolo dedicato in seguito, il problema è ulteriormente accentuato dall'eterogeneità dei parametri descrittivi [19]; non bisogna infatti trascurare che ogni sistema di rilievo della tessitura possiede delle imperfezioni, in alcuni casi intrinseche, in quanto dovute alla struttura dell'apparecchiatura utilizzata (livello di precisione dello strumento), ed altre volte tipiche della stessa metodologia di utilizzo. I risultati ottenuti poi, al fine di essere tradotti in grandezze utili all'impiego, devono essere spesso sottoposti ad algoritmi di calcolo che possono generare altri elementi d'errore. In ultimo possono essere fonte di errori le "manipolazioni" che subiscono le grandezze misurate per essere trasformate in parametri direttamente utilizzabili [20].

---

## 1.4 DEFINIZIONE DI TESSITURA

Come già accennato in precedenza, per quanto riguarda la grandezza tessitura la letteratura scientifica ci fornisce numerose definizioni, di seguito riportiamo quella dell'ISO (International Organization for Standardization) [5] e dell'ASTM (American Society for Testing and Materials) [21]:

ISO 13473
<i>Pavement Texture: The deviation of a pavement surface from a true planar surface, within the wavelength ranges defined in 3.4.</i>

ASTM E 867
<i>Roughness, traveled surface: The deviation of a surface from a true planar surface, with characteristic dimension that affect vehicle dynamics, ride quality, dynamic loads, and drainage, for example, longitudinal profile, transverse profile, and cross slope.</i>

Come possiamo ben notare le due interpretazioni sono differenti in quanto nella ISO la tessitura viene indicata come la deviazione della pavimentazione reale da un piano reale di riferimento, all'interno delle classi di lunghezza d'onda definite nella stessa norma, la definizione dell'ASTM invece associa la tessitura non tanto a condizioni geometriche quanto agli effetti che la stessa ha sul moto dei veicoli. Pertanto nella prima interpretazione possiamo definire la tessitura come una funzione a tre variabili reali  $F(x,y,z) = 0$  dove  $x$ ,  $y$  e  $z$  rappresentano un sistema di riferimento cartesiano coincidente con il piano di riferimento [22].



**Figura 1.3** – Rappresentazione tridimensionale della tessitura superficiale.

## 1.5 IL PROFILO GEOMETRICO

Sezionando la superficie precedentemente descritta  $F(x,y,z) = 0$  con un generico piano parallelo all'asse  $z$  si ottiene una curva bidimensionale che descrive il *profilo* longitudinale della pavimentazione. Come nel precedente paragrafo sulla superficie geometrica riportiamo le definizioni del profilo geometrico secondo ISO [5] e AIPCR [23]:

ISO 13473
<i>Profile: A two dimensional representation of a surface. The profile of a surface is generated if a sensor, like a tip of a needle or a laser spot, continuously touches or shines on the pavement surface while it is moved along the surface.</i>

AIPCR
<i>The profile of the surface is described by its displacement along the surface and its displacement in the direction normal to the surface.</i>

La definizione ISO ci fornisce anche indicazioni su come ottenere il profilo geometrico della pavimentazione grazie alla punta di un ago o ad un raggio laser che, rispettivamente, tocchi o irraggi la superficie stradale mentre ci si sposta sulla pavimentazione stessa. Se supponiamo di considerare il generico piano di sezionamento della superficie  $F(x,y,z) = 0$  coincidente con il piano di equazione  $y = \text{cost.}$  otterremo il profilo  $z(x)$  rappresentato nella figura seguente:

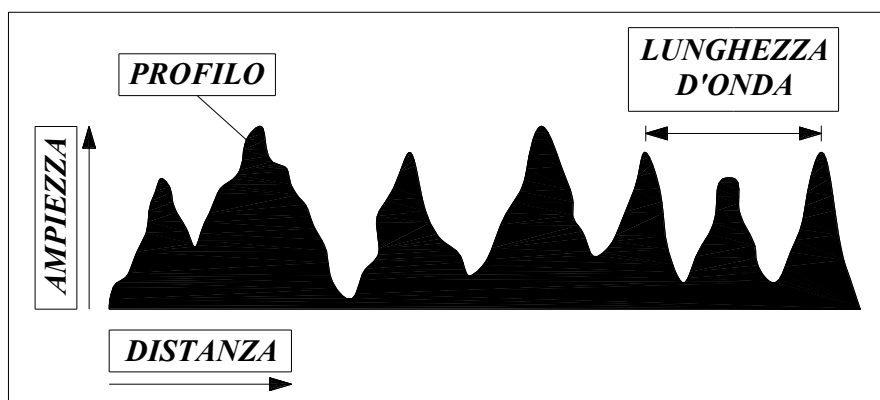
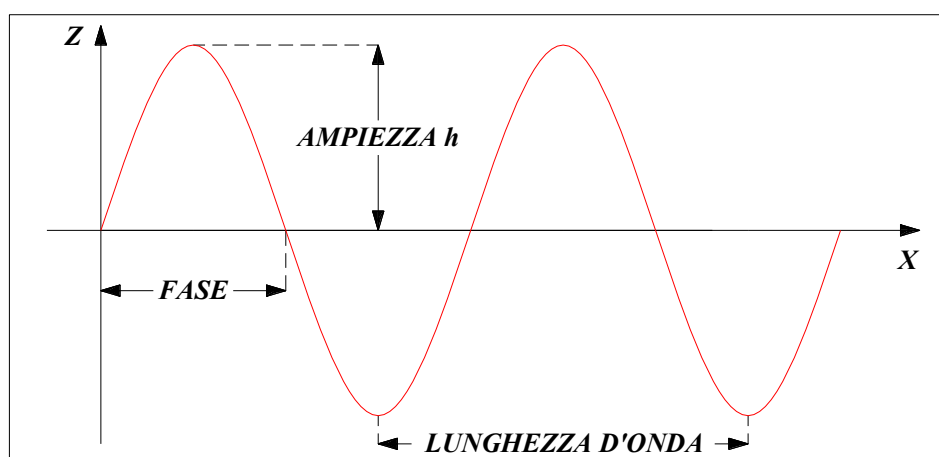


Figura 1.4 – Schematizzazione del profilo generico di una pavimentazione stradale.

La misura delle altezze nelle applicazioni reali è generalmente effettuata tramite l'uso di strumenti denominati *profilometri* che descriveremo dettagliatamente nel prossimo capitolo. I dati forniti da tali apparecchiature, opportunamente elaborati tramite algoritmi di calcolo, consentono la restituzione grafica bidimensionale o tridimensionale della superficie stradale come mostrato nelle figure precedenti.

Possiamo dunque descrivere il profilo come una coppia di ordinate  $(x,z)$  in cui  $x$  rappresenta la distanza percorsa lungo la superficie piana e la  $z(x)$  rappresenta il valore dell'ampiezza, in direzione ortogonale alla precedente superficie, calcolato alla distanza  $x$ . Se la  $z(x)$  fosse una funzione periodica elementare, quale ad esempio un'armonica, sarebbe definita attraverso due grandezze note:

- Ampiezza d'onda  $h$ ;
- Lunghezza d'onda  $\lambda$ .



**Figura 1.5** – Rappresentazione di onda armonica.

In realtà, il profilo stradale non è bene assimilabile ad un segnale di tipo *elementare* ma può essere più verosimilmente paragonato ad un segnale di tipo *composito*; può, infatti, essere assimilato ad una funzione aleatoria della distanza per cui, utilizzando l'analisi di Fourier, è possibile rappresentarlo matematicamente con una serie infinita di componenti sinusoidali di varie frequenze e lunghezze d'onda, ognuna con una data ampiezza e fase iniziale. A tale proposito riportiamo le definizioni ISO [5] e AIPCR [23] per i profili reali:

---

ISO 13473
-----------

<p><i>The profile of a surface is described by two coordinates: one along the surface plane, called distance, and the other in a direction normal to the surface plane, called amplitude.</i></p>
---

<p><i>Texture amplitude: the (minimum) distance between periodically repeated parts of the curve.</i></p>
---

<p><i>For normal surface profiles, a profile analysed by its Fourier components contains a continuous distribution of wavelengths.</i></p>
--

AIPCR
-------

<p><i>Texture amplitude and wavelength: the profile of the surface is described by its displacement along the surface and its displacement in the direction normal to the surface. Texture wavelength is defined as the (minimum) distance between periodically repeated parts of the curve in its direction along the surface plane.</i></p>
---

Da quanto riportato, risultano le seguenti definizioni:

- *Lunghezza d'onda  $\lambda$* : distanza minima fra le parti della curva che si ripetono periodicamente nel verso di avanzamento lungo il piano viario.
- *Ampiezza d'onda  $h$* : dimensione caratteristica del profilo nella direzione ortogonale all'avanzamento.

La *lunghezza d'onda* della tessitura si misura in metri o in millimetri e può essere espressa anche come l'inverso della *frequenza spaziale* che, moltiplicata per il fattore  $2\pi$ , prende il nome di “*numero d'onda angolare della tessitura*” (texture angular wavenumber, [rad/m]) [24].

## 1.6 CLASSIFICAZIONE DELLA TESSITURA

Nel precedente paragrafo, abbiamo detto che il profilo stradale è assimilabile ad una funzione stazionaria e aleatoria della distanza e che, secondo la matematica di Fourier, può essere rappresentata da una distribuzione continua di lunghezze d'onda o di frequenze spaziali [24]. Uno dei possibili modi per valutare la lunghezza d'onda è considerarla quale variabile discreta che assume i valori di una successione “a terzi d'ottava”, cioè del tipo:

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i \cdot 2^{\frac{1}{3}} \quad i = 1 \dots \infty$$

A tal punto dobbiamo associare alla suddivisione dell'intero dominio della tessitura in singole classi nel continuo, la distribuzione in termine di centri di terzi d'ottava.

Possiamo notare che tale suddivisione non è perfettamente coincidente con quella in cui si ragiona in termini di centri di terzi d'ottava; cioè, considerando  $\lambda_c$  variabile discreta, la cui ampiezza è funzione delle caratteristiche degli algoritmi di calcolo [6], non collima mai precisamente con  $\lambda$  variabile continua.

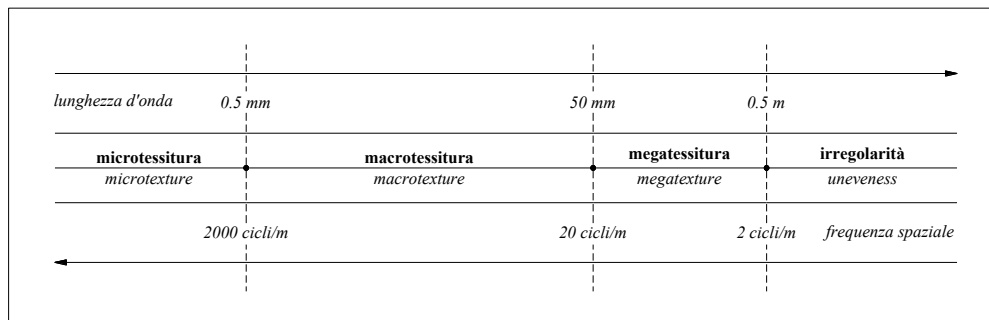
A scopo esplicativo riportiamo il seguente esempio:

Se consideriamo nel continuo il valore 0,5 mm come limite tra i campi della macro e della microtessitura, avremo:

$$\begin{aligned} \lambda_i &= 0.5mm & \lambda_{i-1} &= 2^{(-1/3)} \cdot 0.5 \cong 0.4mm & \lambda_{i+1} &= 2^{(1/3)} \cdot 0.5 \cong 0.63mm \\ \lambda_{i+2} &= 2^{(1/3)} \cdot 0.63 \cong 0.80mm \end{aligned}$$

Si può notare che nel continuo il limite tra micro e macrotessitura è posto a 0.5mm, nell'interpretazione in termini di centri di terzi d'ottava bisogna fissare deliberatamente se  $\lambda_c = 0.5$  mm appartiene al campo della micro o della macrotessitura.

Seguendo le indicazioni ISO ,che opta per la seconda di tali soluzioni [5], la suddivisione nel continuo risulterà difforme da quella nel discontinuo, allo stesso modo potranno risultare modificate le ampiezze dei domini della macro e della microtessitura. Riportiamo in figura le classi di tessitura in funzione della lunghezza d'onda e della frequenza spaziale:



**Figura 1.6** – Classi di tessitura in funzione della lunghezza d'onda e della frequenza spaziale.

Come abbiamo già avuto modo di dire precedentemente la lunghezza d'onda, ovvero la frequenza spaziale, è stata utilizzata quale parametro fondamentale per la classificazione della tessitura superficiale. Di seguito riportiamo le definizioni delle classi di tessitura dei maggiori organi tecnici internazionali [5], [23], [21], [1]:

### **Microtessitura (Microtexture)**

CNR 125/88
<p><i>MICROTESSITURA: Campo di lunghezza delle ondulazioni superficiali <math>\lambda</math>:</i>  <math>\lambda &lt; 0.5 \text{ mm}</math></p> <p><i>CARATTERISTICHE FISICHE SUPERFICIALI:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Scabrezza superficiale dei singoli inerti;</li> <li>– Asperità (punte) dell'aggregato.</li> </ul> <p><i>CARATTERISTICHE INFLUENZATE:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Aderenza (particolarmente in condizione di pavimentazione asciutta o mediamente bagnata);</li> <li>– Usura pneumatico;</li> <li>– Rumore esterno.</li> </ul>

ISO 13473
<p><i>MICROTEXTURE:</i></p> <p><i>the deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimensions along the surface of less than 0.5 mm (corresponding to texture wavelengths with third-octave bands up to 0.4 mm of centre wavelengths).</i></p> <p><i>NOTE 4 – Peak-to-peak amplitudes normally vary in the range 0.001 mm to 0.5 mm. This type of texture is the texture which makes the surface feel more or less harsh but which is usually too small to be observed by the eye. It is obtained by the surface properties (sharpness and harshness) of the individual chippings or other particles of the surfacing which come in direct contact with the tyres.</i></p>

ASTM E867
<p><i>MICROTEXTURE:</i></p> <p><i>Texture, pavement-micro (micro-rugosity): The deviations of a pavement surface from a true planar surface with characteristic dimensions of wavelengths and amplitude less than 0.5 mm. It is suggested that the symbol mitx be used.</i></p>



---

AIPCR
-------

<i>MICROTEXTURE:</i>
----------------------

<i>The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimensions along the surface of less than 0.5 mm (corresponding to texture wavelengths with third-octave bands with no more than 0.4 mm of center wavelengths). Peak-to-peak amplitudes usually vary in the range 0.001 – 0.5 mm. This type of texture is the texture which makes the surface feel more or less harsh but which is normally too small to be observed by the eye.</i>
--

La microtessitura è quindi la deviazione della superficie, rispetto ad un piano, nel dominio delle dimensioni caratteristiche, in senso longitudinale, inferiori a 0.5 mm; ciò corrisponde a lunghezza d'onda (centri di terzo di ottava nel discreto) con valore massimo pari a 0.4 mm.

Le ampiezze cresta a cresta (Peak-to-peak) variano normalmente tra 0.001 mm e 0.5 mm. Questa tipologia di tessitura è quella che rende la superficie più o meno ruvida al tatto ed è di dimensioni talmente ridotte da non essere visibili ad occhio nudo; è ottenuta dalle proprietà superficiali (acutezza e ruvidezza) dei singoli aggregati o di altre particelle della superficie che vengono a diretto contatto con i pneumatici [6].

Seguono le definizioni secondo ISO [5], CNR [1], ASTM [21], AIPCR [23] :

**Macrotessitura (Macrottexture)**

ISO 13473
-----------

<i>MACROTEXTURE:</i>
----------------------

<i>The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimension along the surface of 0.5 mm to 50 mm (corresponding to texture wavelengths with third-octave bands including the range 0.5 mm of center wavelengths).</i>
---

---

## CNR 125/88

*MACROTESSITURA: Campo di lunghezza delle ondulazioni superficiali  $\lambda$ :*

$$0.5 \text{ mm} \leq \lambda \leq 50 \text{ mm}$$

*CARATTERISTICHE FISICHE SUPERFICIALI:*

- *Dimensione, forma e distribuzione degli inerti;*
- *Drenaggio superficiale (deriva da quanto detto sopra);*
- *Asperità (punte) dell'aggregato;*
- *Sottigliezza dei giunti;*
- *Numero delle fessure;*
- *Striature.*

*CARATTERISTICHE INFLUENZATE:*

- *Aderenza (particolarmente nei riguardi del fenomeno dell'aquaplaning);*
- *Usura pneumatico;*
- *Resistenza al rotolamento;*
- *Rumore esterno dovuto al contatto pneumatico – strada;*
- *Rumore interno dovuto al contatto pneumatico – strada;*
- *Riflessione della luce.*

## ASTM E867

*MACROTEXTURE:*

*Texture, pavement-macro (macro-rugosity): The deviations of a pavement surface from a true planar surface with characteristic dimensions of wavelengths and amplitude from 0.5 mm up to those that no longer affect tire – pavement interaction. It is suggested that the symbol MATX be used.*

## AIPCR

*MACROTEXTURE:*

*The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimensions along the surface of 0.5 mm – 50 mm (corresponding to texture wavelengths with third-octave bands including the range 0.5 mm – 50 mm of center wavelengths). Peak-to-peak amplitudes may (normally) vary in the range 0.01 – 20 mm. This type of texture is the texture which has wavelengths in the same order of size as tire tread elements in the tire / road interface.*

Come risulta dalla definizione appena riportata, la macrotestitura è la deviazione, rispetto ad un piano di riferimento, della superficie stradale, nel range delle dimensioni caratteristiche longitudinali comprese tra 0.5 mm e 50 mm; ciò corrisponde a bande di terzi di ottava includenti il range delle lunghezze d'onda della tessitura comprese nell'intervallo 0.5 – 50mm. Le ampiezze cresta a cresta variano normalmente tra 0.01 mm e 20 mm. Questa classe di tessitura presenta lunghezze d'onda dello stesso ordine di grandezza degli elementi di scultura del battistrada del pneumatico nella zona di contatto ruota-pavimentazione.

Le superfici vengono generalmente progettate con particolare attenzione alle caratteristiche di macrotestitura, allo scopo di ottenere un adeguato drenaggio sulla superficie di contatto pneumatico-piano stradale. La macrotestitura è funzione dell'assortimento granulometrico degli aggregati, del dosaggio del legante bituminoso, nonché delle procedure di messa in opera degli strati di miscela [6].

### **Megatessitura (Megatexture)**

ISO 13473
<p><i>MEGATEXTURE:</i></p> <p><i>The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimension along the surface of 50 mm to 500 mm (corresponding to texture wavelengths with third-octave bands including the range 63 mm to 500 mm of center wavelengths).</i></p>

AIPCR
<p><i>MEGATEXTURE:</i></p> <p><i>The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimensions along the surface of 50 mm – 500 mm (corresponding to texture wavelengths with third-octave bands including the range 63 mm – 500 mm of center wavelengths). Peak-to-peak amplitudes usually vary in the range 0.1 – 50 mm. This type of texture is the texture which has wavelengths in the same order of size as tire / road interface (often created by potholes or waviness).</i></p>

---

## CNR 125/88

*MEGATESSITURA (è una sottodivisione del campo relativo alle irregolarità): Campo di lunghezza delle ondulazioni superficiali  $\lambda$ :*

$$50 \text{ mm} < \lambda \leq 5 \text{ m}$$

*CARATTERISTICHE FISICHE SUPERFICIALI:*

- *Buche;*
- *Ondulazioni della superficie stradale;*
- *Singoli fori sulla pavimentazione ammalorata;*
- *Larghezza giunti; (nelle pavimentazioni in calcestruzzo);*
- *Dimensioni dei blocchetti nelle pavimentazioni in pietra.*

*CARATTERISTICHE INFLUENZATE:*

- *Aderenza (perdita di contatto tra pneumatico e strada);*
- *Controllo del veicolo;*
- *Danneggiamento pneumatico;*
- *Danneggiamento e deterioramento del veicolo;*
- *Comfort di guida (vibrazioni 10 – 350 Hz);*
- *Rumore esterno intermittente;*
- *Rumore interno dovuto al contatto pneumatico – strada;*
- *Resistenza al rotolamento.*

La megatessitura consiste nelle deviazioni della superficie stradale rispetto ad un piano, con riferimento a dimensioni caratteristiche longitudinali comprese tra 50 mm e 500 mm (5 m nell'accezione del C.N.R.); ciò corrisponde a lunghezze d'onda di tessitura comprese nell'intervallo 63 mm – 500 mm in termini di lunghezze d'onda centrali di terzi di ottava (ad eccezione fatta per la norma C.N.R.). Le ampiezze cresta a cresta variano solitamente tra 0.1 mm e 50 mm. Questa classe di tessitura presenta lunghezze d'onda dello stesso ordine di grandezza del raggio medio dell'area di contatto pneumatico – pavimentazione ed è spesso generato da buche e “ondulazioni”.

E' generalmente una caratteristica indesiderata risultante da difetti presenti sulla superficie. Le caratteristiche della pavimentazione corrispondenti a lunghezze d'onda superiori a 0.5 m sono attribuite alle irregolarità [6].

---

### Irregolarità (Unevenness)

CNR 125/88
<p><i>IRREGOLARITA': Campo di lunghezza delle ondulazioni superficiali <math>\lambda</math>:</i> <math>0.5\text{ m} &lt; \lambda \leq 40\text{ m}</math></p> <p><i>CARATTERISTICHE FISICHE SUPERFICIALI:</i> <i>Come per la megatessitura con l'aggiunta di:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Irregolarità dovute alla posa in opera;</li><li>– Danni da gelo.</li></ul> <p><i>CARATTERISTICHE INFLUENZATE:</i> <i>Come per la megatessitura con l'aggiunta di:</i></p> <ul style="list-style-type: none"><li>– Comfort di guida (vibrazioni 0.1 – 350 Hz);</li><li>– Ultrasuoni (internamente);</li><li>– Danneggiamenti agli edifici dovuti alle vibrazioni.</li></ul>

ISO 13473
<p><i>UNEVENNESS:</i> <i>The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimension along the surface of 0.5 m to 50 m (corresponding to texture wavelengths with one-third-octave bands including the range 0.63 m to 50 m of center wavelengths).</i></p> <p><i>NOTE 6 – Unevenness is a type of surface roughness which, through vibrations, affects ride comfort in a road holding of vehicles.</i></p>

AIPCR
<p><i>UNEVENNESS:</i> <i>The deviation of a pavement surface from a true planar surface with the characteristic dimensions along the surface of more than 0.5 mm (corresponding to texture wavelengths higher than 0.5 m).</i></p>

L'irregolarità è allora la deviazione della superficie stradale rispetto ad un piano per dimensioni caratteristiche longitudinali variabili da 0.5 m a 50 m (ad eccezione fatta per la norma C.N.R.); ciò può farsi corrispondere a lunghezze d'onda di tessitura comprese

nell'intervallo 0.63 m – 50 m in termini di lunghezze d'onda centrali di terzi di ottava (eccezion fatta per la norma C.N.R.). Alle irregolarità sono collegati fenomeni di natura vibrazionale che ovviamente influiscono sul comfort di marcia dei veicoli.

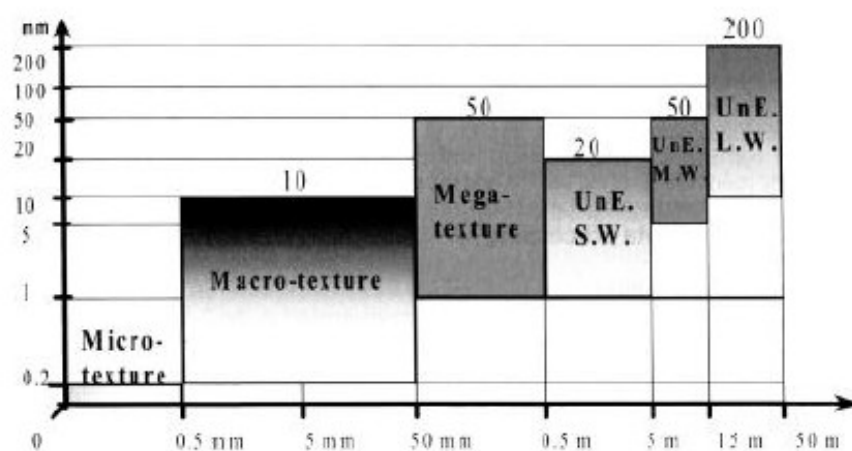
Ricapitolando, in corrispondenza di ogni classe di tessitura è possibile individuare un range di lunghezze d'onda, sia nel continuo sia nel discreto, i cui valori sono rappresentabili nella seguente figura [8], [25]:

lunghezza d'onda	0.5 mm	50 mm	500 mm	500 mm
	microtessitura $\lambda < 0.5$ mm	macrotessitura $0.5 \text{ mm} = \lambda_c = 50$ mm	megatessitura $50 \text{ mm} = \lambda_c = 500$ mm	irregolarità $500 \text{ mm} = \lambda_c = 50$ m
	microtessitura $\lambda_c < 0.4$ mm	macrotessitura $0.5 \text{ mm} = \lambda_c = 50$ mm	megatessitura $63 \text{ mm} = \lambda_c = 500$ mm	irregolarità $630 \text{ mm} = \lambda_c = 50$ m

**Fig 1.7-** Classificazione della tessitura in funzione della lunghezza d'onda nel continuo ( $\lambda$ , in alto) e nel discreto (centri di terzi d'ottava  $\lambda_c$ , in basso).

Con riferimento a tale suddivisione e valutando le risposte dinamiche dei veicoli in relazione al comfort, alla sicurezza, all'ambiente (rumore) e al costo del trasporto, viene fornita [10] un'indicazione delle ampiezze connesse a tali lunghezze d'onda.

Infatti, risulta possibile associare a ciascuno dei domini di lunghezza d'onda riportato un relativo range di variazione caratteristica delle ampiezze [24]:



**Figura 1.8** – Ampiezze e lunghezze d'onda nelle varie classi di tessitura.

## 1.7 STRUMENTI PER LA MISURA DELLA TESSITURA

In generale, si possono individuare due principali famiglie di strumenti per la misura del profilo: le apparecchiature statiche e quelle dinamiche [26]. Nelle prime, la misura del profilo stradale viene eseguita staticamente per punti, mentre nelle seconde il dispositivo di misura si muove raggiungendo velocità anche elevate comparabili con quelle proprie del traffico veicolare, questo per ridurre il disturbo alla circolazione provocato dall'operazione di rilevamento [26]. Tale classificazione non è però condivisa da tutti gli studiosi e molto spesso in letteratura si preferisce distinguere tra apparecchiature per la misura indiretta del profilo stradale e quelle per la misura diretta. Le prime sono denominate dispositivi di tipo "a risposta" (Response Type Road Roughness Measuring Systems (RTRRMS)) e misurano "l'effetto", in termini cinematici (spostamento, velocità o accelerazione), prodotto dall'interazione veicolo-pavimentazione sull'autovettura stessa e discendono direttamente dai primi dispositivi messi a punto all'inizio del secolo, anche se, nella loro configurazione attuale, fanno uso di un'elettronica più sofisticata [26].

I secondi, detti profilometri, invece restituiscono il profilo stradale campionato per punti con un assegnato intervallo.

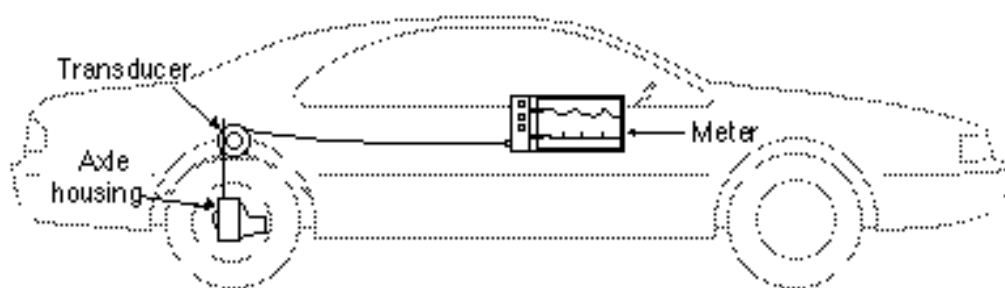


Fig. 1.9 - Sistema di misura del tipo RTRRMS

Complessivamente, i misuratori di tessitura esistenti e attualmente impiegati nei vari Paesi del mondo, possono distinguersi in quattro categorie fondamentali [27]:

- I profilometri;
- Le attrezzature per l'applicazione del metodo volumetrico;
- I drenometri;
- Gli strumenti per le applicazioni di stereofotografia.

---

## 1.8. I PROFILOMETRI

I profilometri sono apparecchiature capaci di fornire un profilo digitale della tessitura di tipo bidimensionale (macrotessitura).

I profilometri stanno ormai soppiantando le apparecchiature di rilievo in continuo (*RTRRMS*) perché sono in grado di fornire una misura più oggettiva e stabile della irregolarità stradale. Infatti, le misure di irregolarità ottenute dalle prime (*RTRRMS*) sono sensibilmente influenzate dalle caratteristiche inerziali e meccaniche degli autoveicoli su cui sono montate. Di contro, bisogna far osservare che anche la misura resa dai profilometri rappresenta un'approssimazione del profilo reale della pavimentazione ed esistono talvolta apprezzabili differenze tra i profili rilevati da due profilometri diversi [28].

Le normative ISO 13473-3 “Characterization of pavement texture utilising surface profiles – Part 3: Specification and classification of profilometers” [29] individua le seguenti quattro proprietà fondamentali per classificare tali dispositivi profilometrici:

1. Mobilità dello strumento;
2. Intervallo di lunghezza d'onda rilevabile;
3. Natura del contatto strumento - pavimentazione rilevabile;
4. Principio di funzionamento del dispositivo di rilievo.

### **1) Mobilità dello strumento**

Per tale proprietà, la normativa prevede quattro distinte classi di apparecchiature [30]:

1. Mobile, ad alta velocità: tale classe è relativa agli autoveicoli equipaggiati con profilometri che possono quindi essere impiegati ad una velocità di prova maggiore o uguale a 60 km/h. Il pregio di tali apparecchiature è che la procedura di acquisizione dei dati durante le operazioni di misura non genera interferenze con il regolare svolgimento del traffico veicolare.
2. Mobile, a bassa velocità: appartengono a questa classe tutti quei profilometri che, seppure installati su autoveicoli, effettuano i rilievi ad una velocità di percorrenza inferiore a 60 km/h per cui, anche se mobili, creano interferenza con il flusso di transito durante la campagna di rilevamento, soprattutto se utilizzati su infrastrutture ad alta velocità di scorrimento.
3. Stazionario in presenza di traffico: questo tipo di apparecchiature vengono posizionati direttamente sulla pavimentazione in corrispondenza del punto che si



vuole rilevare. Il vantaggio fornito è dato dal fatto che sono facilmente movimentabili da un punto di rilevamento all'altro per cui si possono effettuare le misure necessarie senza eccessivo intralcio per la circolazione chiudendo solo parzialmente la sezione stradale interessata anche se ciò comporta un inevitabile rallentamento del flusso veicolare. Le apparecchiature di questa tipologia sono in genere montate su rimorchi trainati da veicoli oppure sistemate su carrelli che vengono spinti manualmente;

4. Stazionario in assenza di traffico: si tratta di tutte quelle apparecchiature per le misure di tessitura che non possono essere spostate velocemente da un sito di misura all'altro per cui si rende necessario limitare il traffico della sezione stradale indagata ed, in alcuni casi, si rende addirittura indispensabile la chiusura dell'intero tratto di infrastruttura oggetto di indagine durante la campagna di prove.

## **2) Intervallo di lunghezza d'onda rilevabile**

In merito a questa proprietà dello strumento, vengono indicati cinque range di variabilità contraddistinti da una lettera [29]:

Classe	A	B	C	D	E
Intervallo di lunghezza d'onda	0.05 – 0.16 mm	0.2 – 0.5 mm	0.63 – 2.0 mm	2.5 – 50 mm	63 – 500 mm

**Fig 1.10** – Classificazione degli strumenti secondo gli intervalli di lunghezza d'onda

Un profilometro si indica appartenente ad una o più classi solo se il range di lunghezza d'onda rilevato dallo strumento ricade per intero nell'intervallo di lunghezza d'onda della classe considerata dalla tabella soprastante.

Ad esempio, possiamo classificare come WR Class BCDE un profilometro che riesce a misurare un intervallo di lunghezza d'onda compreso tra 0.2 e 500 mm.

## **3) Natura del contatto con la superficie rilevata**

Per quanto riguarda la natura del contatto tra strumento e pavimentazione possiamo classificare i profilometri secondo due distinte tipologie [29]:

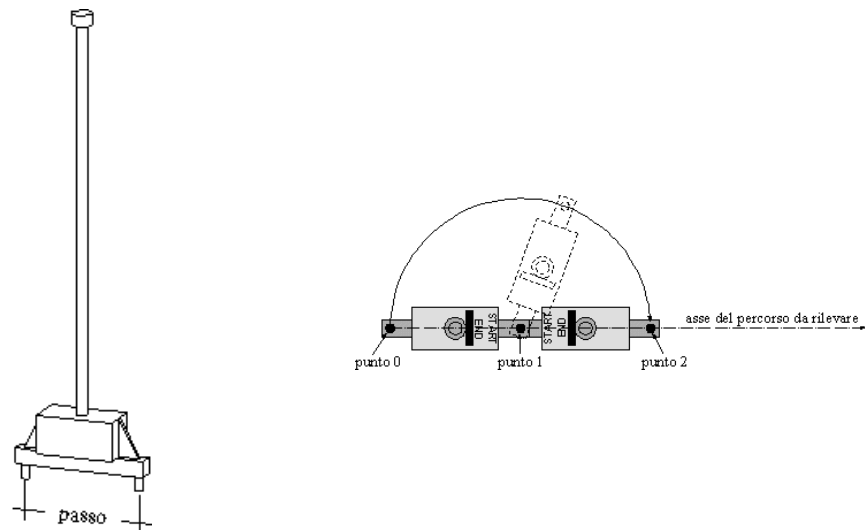
- 
- Dispositivi di contatto: in tali dispositivi il sensore che esegue la lettura della tessitura, durante le operazioni di prova, instaura un vero e proprio contatto fisico con la superficie indagata.
  - Dispositivi di non – contatto (contactless device): in cui il sensore che esegue la lettura, durante le operazioni di rilievo, non ha un contatto fisico con la superficie, pertanto rilevano la quota di un punto della pavimentazione tramite la proiezione, su tale punto, di un'onda acustica o elettromagnetica [31].

La differenza operativa è sostanziale: i primi, dovendo avere una parte a continuo contatto con la pavimentazione non possono muoversi a velocità elevate durante il rilievo, cosa che risulta la prerogativa principale dei sistemi del secondo tipo.

In merito all'affidabilità con cui il rilievo è effettuato, i profilometri sono stati suddivisi dalla World Bank in due classi [32] : alla Classe 2 appartengono quelli che possono apportare al rilievo un errore casuale; alla Classe 1 appartengono quelli più accurati, nei quali la possibilità che il rilievo venga affetto da un errore casuale è estremamente bassa. Gli strumenti della Classe 1 sono anche utilizzati per la taratura di quelli della Classe 2 [32].

**Profilometri a contatto:** a questa prima famiglia appartengono la semplice asta rigida (rod and level), rispetto alla quale computare il profilo per punti, ed il Dipstick [26] che rappresenta una versione evoluta di un inclinometro, in quanto rileva la differenza di quota fra due punti sui quali poggiano i supporti dello strumento stesso, ed anch'esso fornisce il profilo stradale per punti [33]. Tale dispositivo è costituito da un corpo con due supporti ed un'asta verticale utile per manovrarlo (Fig. 1.11).

La distanza tra i supporti è regolabile (passo) da un minimo di 7.5cm ad un massimo di 30cm. E' disponibile anche una versione con rotelle al posto degli appoggi fissi (Rolling Dipstick) [26]:



**Fig. 1.11** - Il Dipstick (sinistra).e la procedura operativa per il rilevamento (destra)

I dati vengono registrati su un supporto magnetico, tramite un Personal Computer in dotazione al sistema, e vengono forniti sotto forma di elevazione dei diversi punti rilevati rispetto ad un punto iniziale.

Operativamente lo strumento si manovra manualmente nel modo seguente: fissata la traccia del percorso da rilevare, si posiziona l'asse dello strumento in linea con essa e si rilevano così i primi due punti (punto 0 e punto 1 di Fig.1.11). Facendo poi perno nel punto 1 si fa compiere allo strumento una rotazione di  $180^\circ$ , ottenendo così il rilevamento del punto 2 di Fig.1.11. Si prosegue in tal modo fino a completare l'intero percorso. La velocità di rilevamento, per operatori esperti, è di circa 500 letture per ora, cioè per un passo di 10cm si coprono circa 50 m in un'ora. Il Dipstick, per la sua precisione nel rilievo dei profili delle pavimentazioni, rientra nella Classe 1 (*profilometri ad elevata precisione*) della classificazione fornita dalla World Bank, per cui viene spesso utilizzato per calibrare altre apparecchiature e questo è appunto uno dei suoi maggiori pregi [34].

Tale apparecchiatura però non è da preferire per i rilievi dei profili delle pavimentazioni stradali, finalizzati allo studio delle vibrazioni indotte dal traffico veicolare, poiché il passo di rilevamento non può scendere al di sotto dei 7.5cm.

Tenendo conto, inoltre, che per definire un'onda sinusoidale sono necessari almeno due punti (ciò per il procedimento stesso dell'analisi di Fourier), se ne deduce che il Dipstick filtra nel rilevamento tutte le componenti di lunghezza d'onda inferiori a 15cm (due volte il passo). In tali campi di lunghezza d'onda (o equivalentemente di frequenza maggiore di 6.666 cicli/m) possono, invece, presentarsi irregolarità che maggiormente

---

interessano la generazione di vibrazioni nel suolo al passaggio di un veicolo, rendendo quindi il profilo rilevato povero di informazioni [26].

**Profilometri in assenza di contatto:** Tali strumenti [31], [35], [36], [37], sono generalmente costituiti da uno o più sensori ad onde acustiche o elettromagnetiche, montati su un veicolo. I sensori più usati oggi sono quelli laser a luce infrarossa, presentando questi ultimi una precisione molto spinta ed essendo efficienti anche con luce diurna. I sensori laser sono estremamente delicati e costosi, e potrebbero non funzionare in condizioni difficili. Ad esempio, bisogna accuratamente tenere pulite le lenti del laser affinché non siano coperte da polvere, pioggia o fango. Il rilevamento mediante sensori elettromagnetici è basato sulla misurazione dell'angolo al quale un raggio laser, proiettato dal veicolo verticalmente verso il basso sulla pavimentazione, è visto dal sistema. Un rilevamento effettuato con un solo sensore, però, fornisce unicamente la quota relativa del sensore rispetto alla pavimentazione, e ciò non è sufficiente per conoscere il profilo di quest'ultima, comprendendo il rilievo anche gli spostamenti del veicolo in movimento. Per ottenere la quota della pavimentazione rispetto ad un punto della pavimentazione stessa si utilizza pertanto o un accelerometro posto sulla struttura del sensore (profilometri senza contatto inerziali), che fornisce, attraverso una doppia integrazione, gli spostamenti del sensore stesso, oppure ulteriori laser che individuano il riferimento attraverso l'elaborazione delle quote di più punti. Tra i vari sistemi presenti oggi sul mercato menzioniamo il K. J. Law (GMR-Type Integrator), il ICC, il FHWA PRORUT [38].

#### **4) Principio di funzionamento**

Il modo più usuale per individuare e classificare un profilometro è quello in base al principio di funzionamento dell'attrezzatura di rilievo.

Secondo tale aspetto possiamo stabilire quattro categorie fondamentali [27] :

- Dispositivi a funzionamento laser (Laser Profilometer);
- Attrezzature a contatto d'ago (Stilus Profilometer);
- Strumenti a sezionamento di luce (Light Sectioning Profilometer);
- Profilometri ad ultrasuoni (Ultrasonic Profilometer).

---

### 1.8.1 PROFILOMETRI LASER

Il largo utilizzo di simili attrezzature a funzionamento laser si deve proprio alle caratteristiche intrinseche delle stesse che possono così individuarsi [39]:

- monocromaticità: l'insieme delle onde elettromagnetiche che viene emesso dallo strumento è infatti relativo ad una sola frequenza;
- coerenza: ovvero l'esistenza di un'unica fase nel corso di una stessa pulsazione;
- orientabilità e monodirezionalità.

Grazie alle prime due proprietà (monocromaticità e coerenza) lo strumento, utilizzando un appropriato filtraggio, può distinguere con eccellente contrasto la luce laser da quella dell'ambiente. La terza proprietà (monodirezionalità) consente di ottenere raggi laser di sezione sottile, dell'ordine di  $1/100$  di  $\text{mm}^2$  con una ridotta dispersione del segnale luminoso.

Generalmente, un profilometro che impiega la tecnologia laser è costituito da due componenti fondamentali [26]:

- una sorgente di emissione;
- un captatore-trasduttore.

Il criterio di funzionamento di un profilometro laser si fonda sul principio ottico della triangolazione: la sorgente di emissione proietta un raggio laser sulla pavimentazione, con un certo angolo d'inclinazione rispetto alla normale; tale raggio, diffusa dalla superficie stradale, viene ricevuto dal captatore-trasduttore che è anch'esso in posizione inclinata per poter ricevere il segnale di ritorno, tale aliquota del raggio viene poi trasmessa attraverso una lente al trasduttore (semiconduttore foto sensibile) [40], [41], [42], [43].

L'insieme sorgente captatore-trasduttore fornisce, come dato di output, un segnale d proporzionale all'altezza  $h$  cioè alla distanza tra il punto di incidenza del laser sulla pavimentazione e la sorgente di emissione.

L'avanzamento dell'intera apparecchiatura laser lungo una direzione parallela alla superficie stradale, avviene grazie ad un veicolo, ad un carrello trainato o ad un binario di scorrimento e permette di associare a ciascuna delle altezze misurate il valore della distanza orizzontale percorsa per cui si riesce ad ottenere il profilo bidimensionale  $z(x)$ . Tale schema di funzionamento è comune a tutti i profilometri laser, eventuali differenze possono derivare dall'ottica geometrica di incidenza che il raggio laser utilizza per

---

intercettare il piano viabile, ciò dipende naturalmente dalle caratteristiche tecniche del captatore–trasduttore.

Per quanto riguarda le prestazioni fornite da tali strumenti esse sono correlate essenzialmente alla dimensione della sezione del raggio. Per apprezzare classi di tessitura con lunghezze d'onda sempre più piccole, bisogna utilizzare raggi laser con diametro medio sempre minore.

La norma ISO 13473-3, a tal proposito, indica per ogni classe di profilometro un valore minimo di risoluzione orizzontale che rappresenta il limite massimo raggiungibile dal diametro medio del raggio laser [29]:

Classe	A	B	C	D	E
Minima risoluzione orizzontale $\Delta x$	0.02 mm	0.05 mm	0.20 mm	1 mm	10 mm

**Fig 1.12** – Classificazione dei profilometri laser secondo la risoluzione orizzontale minima

In base a quanto detto, si stabilisce che un profilometro laser del tipo WR class B con intervallo di lunghezza d'onda rilevabile 0.2 – 0.5 mm, ha un valore minimo della risoluzione orizzontale fissato dal predetto standard pari a  $\Delta x = 0.05$  mm; ciò vuol dire che il dispositivo in esame, per appartenere alla classe B, dovrà emettere un raggio laser di diametro medio inferiore a tale valore di  $\Delta x$ .

La motivazione di tale legame tra diametro medio del raggio laser e lunghezza d'onda di tessitura rilevabile è del resto facilmente intuibile: per rilevare infatti una lunghezza d'onda di 0.02 mm, è necessaria una risoluzione (intesa come il minor valore di lunghezza che lo strumento riesce a percepire e quindi a rilevare) inferiore di almeno un ordine di grandezza rispetto alla misura, così che il diametro medio del raggio proiettato sia idoneo a permettere la percezione di tale entità geometrica [26].

## 1.8.2 PROFILOMETRI AD AGO DI CONTATTO

Tali strumenti di misura della tessitura rappresentano, come linea di principio, i progenitori di tutti i dispositivi di rilievo del profilo stradale. La metodologia utilizzata da tali dispositivi è analoga a quella del grammofono: una sonda appuntita, muovendosi a contatto lungo una superficie, “legge” le piccole irregolarità percepite e le trasforma in

---

altre forme di energia. I primi studi effettuati con questa tipologia di strumenti per l'analisi delle superfici stradali risalgono al 1944, al fine di avere una restituzione grafica del profilo il minuscolo spostamento verticale della sonda veniva amplificato meccanicamente fino a rendere visibile la fluttuazione di un pennino su di un foglio di carta [30]. Altre versioni amplificavano i movimenti verticali della sonda tramite sistemi ottici che di seguito registravano il segnale su una pellicola fotografica.

Attualmente, grazie ad una lunga serie di innovazioni tecnologiche, si è giunti ad apparecchiature in cui l'impiego di trasduttori elettrici consente di trasformare i movimenti meccanici dell'ago in oscillazioni elettriche. Questi dispositivi sono dotati di un ago sonda, in posizione verticale rispetto alla superficie d'indagine, il quale da una condizione di "riposo" viene abbassato fino a toccare fisicamente la pavimentazione. Un trasduttore, meccanicamente collegato all'ago, capta l'entità del movimento verticale trasformandolo in un segnale elettrico [44]. L'ago viene quindi spostato in direzione orizzontale lungo la superficie da investigare; ad ogni spostamento orizzontale si fa corrispondere un abbassamento dell'ago (naturalmente fino a contatto con la sovrastruttura) registrando contemporaneamente sia gli spostamenti verticali sia quelli orizzontali [30].

### **1.8.3 PROFILOMETRI A SEZIONAMENTO DI LUCE**

Questa categoria di profilometri utilizza una sorgente di luce per produrre sulla pavimentazione una sottile linea o una banda intensa di luce, con bordi nettamente definiti. La sorgente luminosa potrebbe essere discontinua (flash con un piccolo espositore a tempo) oppure una sorgente continua. Una camera fotografica o videocamera riprende questa linea ("taglio") di luce con un certo angolo di inclinazione rispetto alla direzione del raggio luminoso. Nell'output della camera, costituito da un piano x-z, il profilo è rappresentato dalla linea di contrasto fra la zona illuminata ed il resto della pavimentazione (parte buia) [30].

L'applicazione di tali profilometri richiede generalmente la gestione di immagini ad alta risoluzione, per poter effettivamente percepire le micro-grandezze del piano di via [27].

---

#### **1.8.4 PROFILOMETRI AD ULTRASUONI**

Tali dispositivi sono dotati di un sensore elettro – acustico mobile che emette e riceve ultrasuoni. Questi segnali vengono prima inviati alla pavimentazione e successivamente dalla stessa riflessi per essere intercettati da un apposito microfono [26]. La misurazione viene effettuata considerando l'intervallo di tempo tra la trasmissione e la ricezione in modo da poter calcolare la distanza che intercorre tra la sorgente del fascio di ultrasuoni e la superficie indagata. Il dato di output è fornito generalmente da un segnale elettrico proporzionale alla suddetta distanza. Tali strumenti, oltre a rilevare il profilo della superficie stradale, vengono spesso utilizzati anche per il monitoraggio della megatessitura e delle irregolarità superficiali [30].



---

## CAPITOLO II

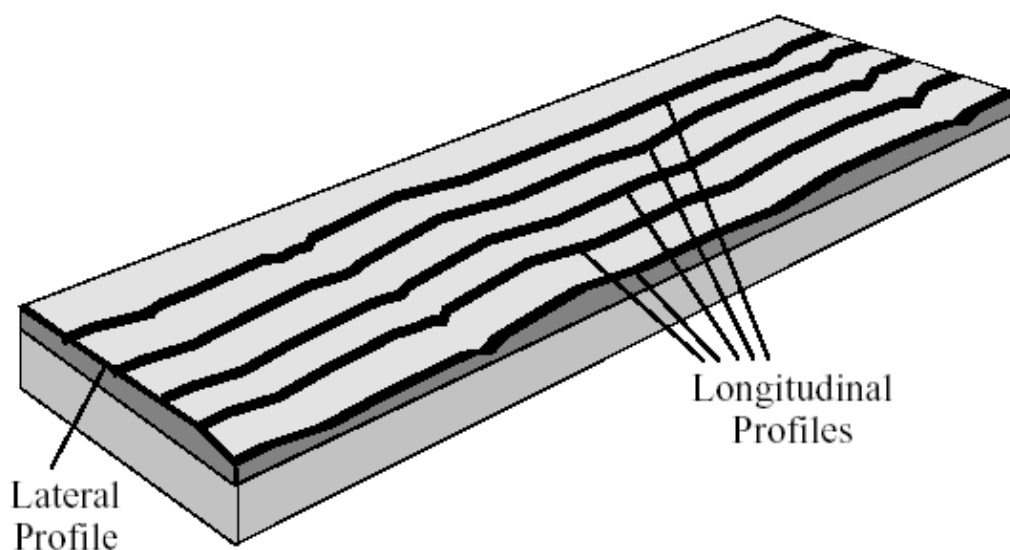
### ***METODI DI RAPPRESENTAZIONE DEL PROFILO E RIELABORAZIONE DEI PROFILI***

#### **2.1 GENERALITA'**

La superficie di una pavimentazione stradale, per sua natura, non può essere perfettamente piana. Lo scostamento della pavimentazione dalla planeità viene denominata tessitura [1]. Il diagramma delle quote della pavimentazione stradale lungo una qualunque linea viene definito profilo.

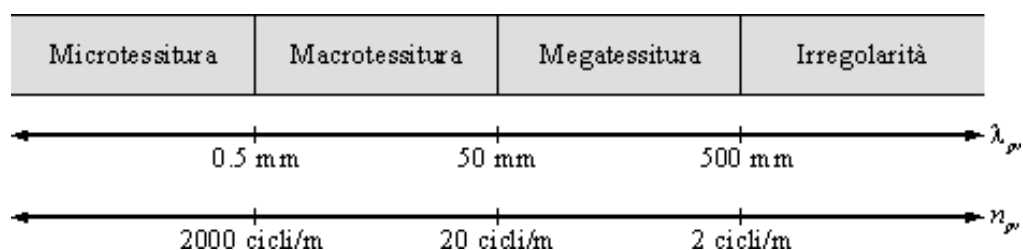
Pertanto, possiamo chiamare Profilo un tracciato bidimensionale della superficie stradale, preso lungo una qualsiasi linea immaginaria.

Un Profilo, può essere tracciato facendo riferimento ad una qualsiasi linea, ma, generalmente, i profili delle pavimentazioni stradali si rilevano lungo linee parallele all'asse stradale (profili longitudinali), oppure lungo linee ortogonali a tale asse (profili trasversali).



**Fig 2.1** – Profilo Longitudinale e Profilo Trasversale

I profili longitudinali che interessano nella maggior parte dei casi, sono quelli rilevati lungo i percorsi delle ruote dei veicoli, che risultano i più espressivi riguardo alle condizioni della pavimentazione. Le maggiori informazioni fornite dai profili trasversali, invece, riguardano il grado di avvallamento raggiunto a causa del fenomeno dell'ormaiamento. La classificazione dei vari livelli di tessitura viene oggi universalmente operata attraverso la scomposizione del profilo della pavimentazione in una serie di profili sinusoidali ed utilizzando quindi come parametro la lunghezza d'onda  $\lambda_{pv}$ . Come già richiamato in precedenza, la norma CNR B.U. 125/88 definisce, ad esempio, quattro classi di tessitura in funzione di  $\lambda_{pv}$  (Fig.2.2). In corrispondenza di tale classificazione si hanno generalmente i valori  $h_{pv}$  di ampiezza della tessitura riportati nella Tabella seguente [1]



Tessitura	$\lambda_{pv}$ (mm)	$h_{pv}$ (mm)
Micro	$< 0.5$	$0.001 \div 0.5$
Macro	$0.5 \div 50$	$0.01 \div 20$
Mega	$50 \div 500$	$0.1 \div 50$
Irregolarità	$> 500$	-

**Fig. 2.2** - Classificazione della tessitura delle pavimentazioni

La larghezza della zona rilevata è, ovviamente, funzione dello strumento adoperato; ad esempio se si effettuasse la misura con un Profilometro Laser, la larghezza della superficie interessata sarebbe di qualche decimo di millimetro, mentre se si adoperasse un Profilometro ad ultrasuoni la larghezza interessata sarebbe dell'ordine di grandezza dei centimetri [2].

---

## 2.2 TECNICHE DI RAPPRESENTAZIONE DEL PROFILO

Come si è visto precedentemente, tra gli strumenti in grado di misurare un Profilo stradale i dispositivi così detti a risposta sono stati oramai quasi del tutto soppiantati dai Profilometri, [2].

Ricordiamo che questi ultimi restituiscono il profilo stradale campionato per punti con un assegnato intervallo spaziale, e che a loro volta si distinguono in strumenti a contatto ed in assenza di contatto, [2].

Della prima classe di Profilometri, tra i quali il più noto è il Dipstick, abbiamo già sufficientemente esposto in precedenza; ulteriori specificazioni richiede invece il funzionamento dei Profilometri in assenza di contatto, ed in particolare quelli Laser.

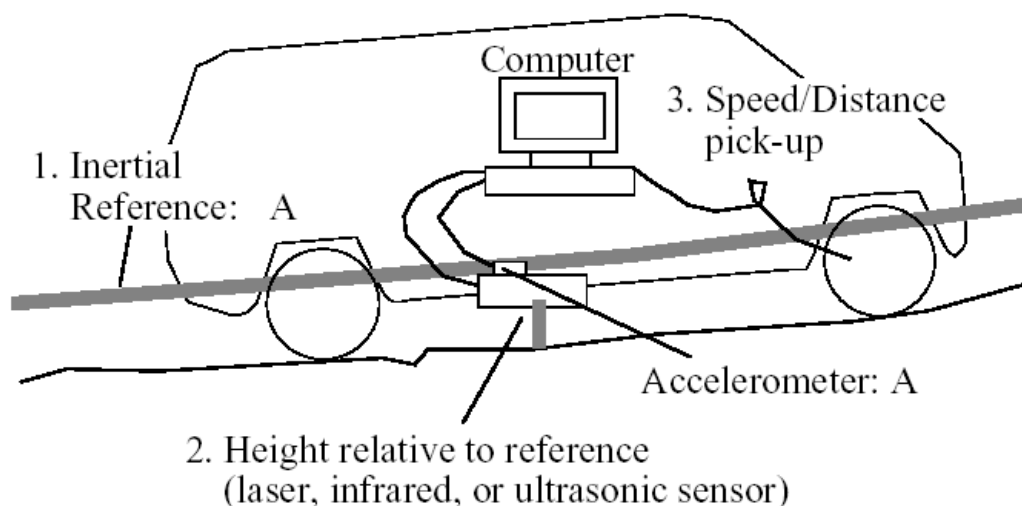
Tali strumenti sono generalmente costituiti da uno o più sensori ad onde acustiche o elettromagnetiche, montati su un veicolo [3], [4]; oggi i più usati sono quelli laser, in quanto consentono di avere una precisione molto spinta [2].

Il raggio laser viene proiettato verticalmente sulla pavimentazione stradale, pertanto il rilevamento del profilo attraverso l'utilizzo di sensori elettromagnetici (laser) consiste nella misurazione dell'angolo al quale tale raggio è visto dal sistema [2].

In questo modo però, adoperando un unico sensore, si riesce a valutare unicamente la quota relativa del sensore rispetto alla pavimentazione considerando in questo modo anche gli spostamenti del veicolo in movimento, tale procedura risulta quindi insufficiente per ottenere il profilo della pavimentazione.

Per conoscere la quota della pavimentazione rispetto ad un punto della stessa si dovrà quindi adoperare un accelerometro posto sulla struttura del sensore (profilometri senza contatto inerziale), che fornisce, tramite una doppia integrazione, gli spostamenti del sensore stesso, oppure si dovrà provvedere a sistemare ulteriori sensori laser che individuino il riferimento attraverso l'elaborazione delle quote di più punti [2].

Nei profilometri inerziali, il riferimento è ricavato attraverso un accelerometro, esso è un sensore che misura l'accelerazione; attraverso un processore ed un adeguato algoritmo, tale accelerazione verticale viene convertita in un riferimento inerziale che definisce l'altezza istantanea dell'accelerometro [5]:



**Fig. 2.3.** Componenti di un Profilometro inerziale.

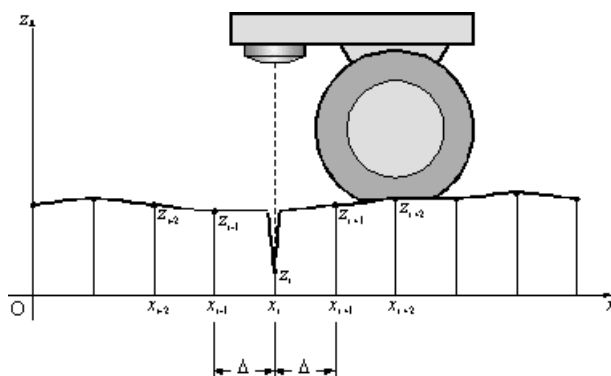
E' importante specificare che, per i profilometri senza contatto inerziali, la velocità di marcia da tenere durante il rilievo non può essere troppo bassa, tale da non sollecitare la sensibilità dell'accelerometro. Ad esempio il migliore dei profilometri inerziali non può lavorare a velocità inferiori a 16km/h [2]. Ciò può essere incompatibile con la sicurezza in ambito urbano, dove non è consigliabile viaggiare a velocità eccessive. Come limite superiore, la velocità del veicolo durante il rilevamento può essere anche di parecchie decine di km/h, e perciò vengono anche chiamati *profilometri ad alta velocità (high-speed profilometers)* [2].

Tra i vari sistemi presenti oggi sul mercato menzioniamo il *K. J. Law (GMR-Type Integrator)*, il *ICC*, il *FHWA PRORUT*; quest'ultimo può effettuare campionamenti ogni 2 pollici (~50mm), valore che è oggi fra i più bassi fra quelli possibili per i profilometri senza contatto [2].

Come evidenziato dalla Fig. 2.3, alcuni modelli dotati a bordo di elaboratori elettronici hanno la possibilità di analizzare direttamente i dati acquisiti in modo completamente automatico.

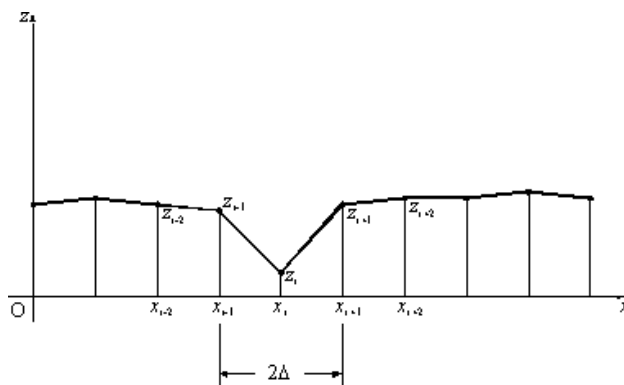
Il rilevamento delle quote dei punti, a causa della precisione molto spinta, può indurre in errore nella misura connesso principalmente ad una erronea restituzione del profilo in corrispondenza di irregolarità localizzate caratterizzate da una profondità elevata rispetto alla loro lunghezza longitudinale, per cui, ad esempio, il profilo approssimato può presentare delle irregolarità che generano alti livelli di vibrazione al passaggio di un

veicolo, laddove la pavimentazione presenta semplicemente una fessura che non è neanche avvertita dal veicolo [6]:



**Fig. 2.4.** - Fessura rilevata nella pavimentazione da una apparecchiatura laser.

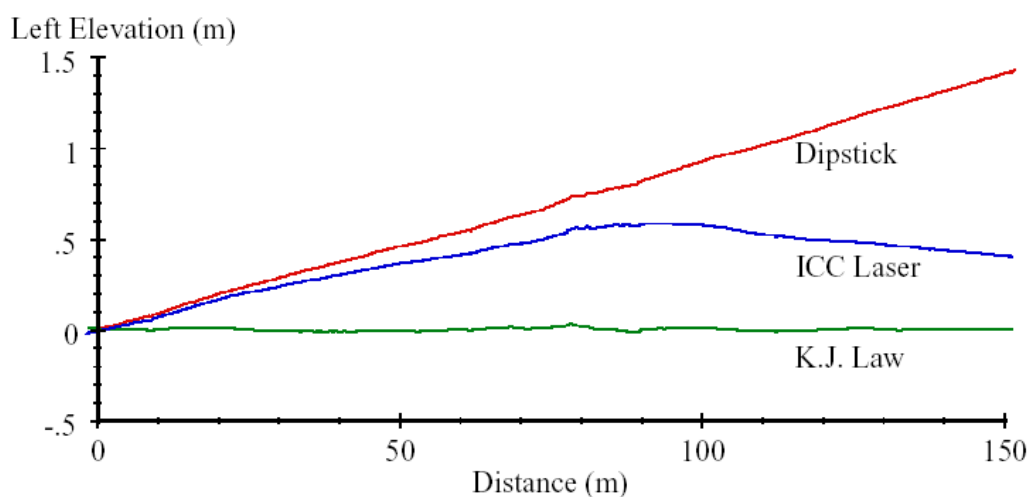
Tale fenomeno è dovuto al fatto che, generalmente, il profilo approssimato si ottiene nell'ipotesi di pendenza costante tra i punti rilevati. In tal caso, all'ascissa  $x_i$  della pavimentazione si registrerebbe un avvallamento cuneiforme di ampiezza doppia dell'intervallo di rilevamento  $\Delta$  e profondità  $z_i$  pari a quella della fessura, restituendo in tal modo un profilo approssimato con una rilevante irregolarità [6]:



**Fig. 2.5.** – Profilo approssimato restituito.

Infine, a causa della sensibilità dell'accelerometro, che non può essere infinitamente grande, i profilometri inerziali non sono in grado di rilevare ondulazioni della strada di lunghezza d'onda molto grande, così come non possono rilevare le pendenze longitudinali su lunghezze notevoli.

Quindi, un profilo ottenuto con un profilometro inerziale non può essere guardato come una misura statica, e il confronto tra un profilo ottenuto in questo modo ed uno ottenuto con un profilometro statico dà risultati soddisfacenti in alcuni casi ma non in altri, [2]. Per esempio, la figura sottostante mostra lo stesso profilo ottenuto con un Dipstick e con due profilometri inerziali, [2]:



**Fig. 2.6.** Profilo misurato con tre differenti strumenti.

E' naturale che un profilometro di qualsiasi tipo non può cogliere completamente e in ogni dettaglio il profilo della pavimentazione lungo un prefissato percorso. Il rilievo della pavimentazione, in realtà, è costituito da un campionamento delle quote lungo il percorso.

Un profilometro è definito valido se è capace di fornire un rilievo del profilo dal quale i valori statistici che se ne possono estrarre sono approssimativamente gli stessi che si possono estrarre dal *profilo vero* [2].

Con un profilometro non ricaviamo ogni informazione ottenibile dal profilo vero ma solo quelle di interesse, in quanto maggiori sono le informazioni da e maggiori sono i costi. E' naturale che nessuno strumento è perfetto ed un certo livello d'errore è sempre presente [2].

## 2.3 RAPPRESENTAZIONE DIRETTA DEL PROFILO

Il profilo vero, rappresenta una raffigurazione continua della superficie stradale e gli strumenti capaci di produrre questa misura in continuo vengono detti analogici , in quanto la misura varia analogamente alla variabile interessata.

Alternativamente, una variabile continua è spesso rappresentata con una sequenza di numeri: questa rappresentazione viene appunto detta digitale, [2]. Ogni sistema di rilievo del profilo in uso oggi è di tipo digitale.

Si definisce intervallo di campionamento  $\Delta$ , la distanza longitudinale tra due successive misure effettuate. Ad esempio, per un profilometro Dipstick l'intervallo di campionamento è rappresentato dalla distanza tra i due piedini di supporto dello strumento, per un profilometro inerziale ad alta velocità tale intervallo è la distanza tra i tempi a cui il calcolatore preleva le letture digitali dal trasduttore, [2].

L'intervallo di campionamento determina il numero di altezze per kilometro, immagazzinate. Per l'analisi di un profilo, è in oltre essenziale avere familiarità con il concetto di sinusoidi, come le funzioni seno e coseno, le quali sono descritte da una lunghezza d'onda, un'ampiezza ed una fase.

Matematicamente, un profilo arbitrario può essere costruito da una serie di sinusoidi con diversa lunghezza d'onda, ampiezza e fase, [2].

L'espressione di una sinusoide  $Y$  come funzione di  $X$  è rappresentata da :

$$Y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(X - X_0)\right)$$

dove i termini richiamati nell'espressione sono descritti dal grafico seguente, [2]:

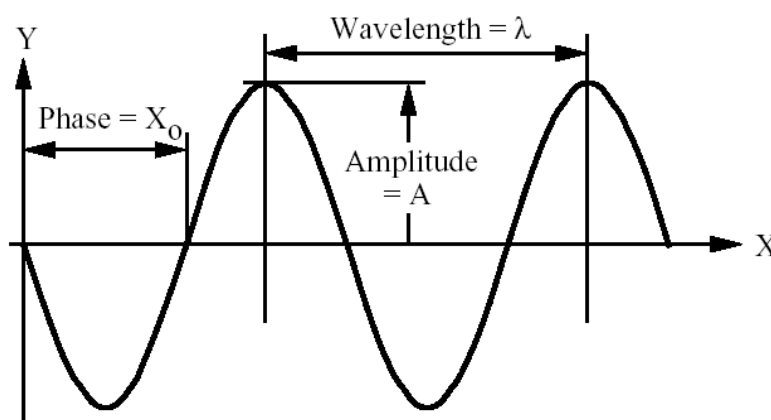


Fig. 2.7 – Caratteristiche di una sinusoide.

---

In molte applicazioni della teoria dei segnali le sinusoidi sono definite come funzioni del tempo, piuttosto che della distanza; esse sono quindi convenzionalmente definite con la frequenza di cicli per secondo, detta Herz.

Quando le sinusoidi sono definite nel dominio delle lunghezze, la frequenza di cicli per unità di lunghezza è chiamata numero d'onda:  $\nu = \frac{1}{\lambda}$ .

Si definisce quindi numero d'onda il numero di cicli per unità di lunghezza, misurato in cicli/metro, [2].

Altro concetto basilare per l'utilizzo di profilometri è quello di risposta in frequenza, in quanto l'analisi dei profili è spesso rappresentata da tracciati di risposta in frequenza. La risposta in frequenza è il modo più diffuso per rappresentare il comportamento input-output di un qualsiasi sistema, quindi anche di quelli lineari.

Un sistema lineare, quali ad esempio i filtri, è un particolare sistema in cui l'output è proporzionale all'input, per cui un segnale sinusoidale con un sistema lineare produce come output ancora un segnale sinusoidale, con stessa lunghezza d'onda ma con ampiezza e fase generalmente diversi., [2]

Tali aspetti verranno approfonditi nel successivo paragrafo dedicato ai filtri.

### **2.3.1 FILTRAGGIO DEL PROFILO RILEVATO**

Il rilievo della pavimentazione ,concretamente, è costituito da un campionamento delle quote lungo il percorso, per cui il profilo stradale può essere visto alla stregua di un segnale acquisito elettronicamente di tipo digitale e per cui si rende spesso necessario ripulire il segnale stesso dal disturbo (*noise*) arrecato da altri segnali raccolti nell'acquisizione, oppure eliminare talune informazioni presenti nel segnale e che non sono d'interesse. Tale procedura denominata filtraggio, comunemente adottata nella teoria dell'analisi dei segnali, costituisce un aspetto estremamente importante nella valutazione del profilo, [2].

In sostanza, un filtro digitale rappresenta una procedura che trasforma una serie di numeri in una nuova serie di numeri, [2].

Per esempio, consideriamo le tre misure di profili riportate nella Fig. 2.6; i particolari della rugosità del profilo sono quasi invisibili in questo diagramma in quanto lo stesso non è filtrato, [2].



E' quindi necessario filtrare il segnale per vedere le differenti caratteristiche del profilo. La prossima figura mostra gli stessi tre profili dopo il filtraggio per rimuovere le frequenze che non interessano, [2]:

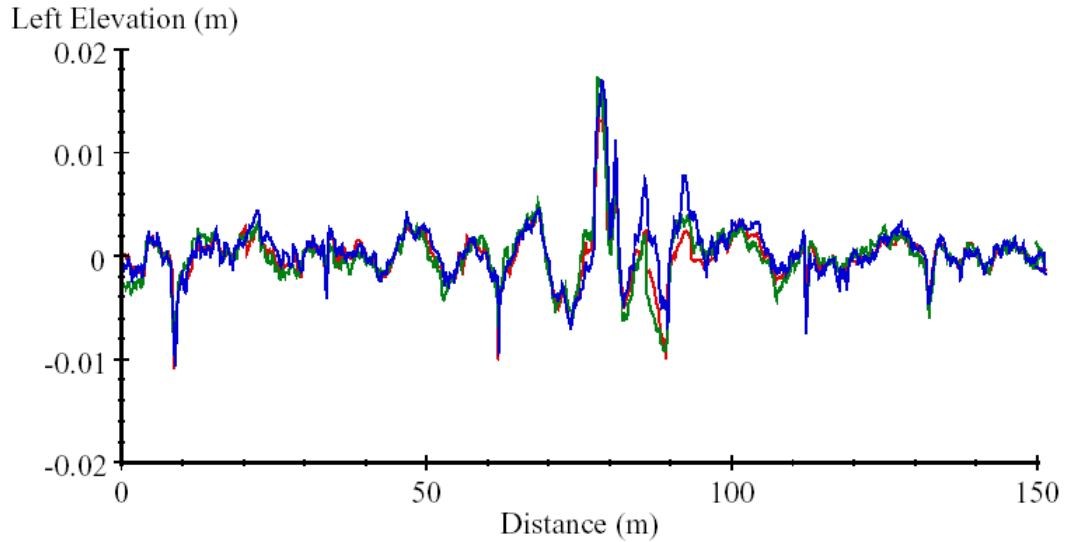


Fig. 2.8. Profili filtrati.

### 2.3.1.1 FILTRO MEDIA MOBILE

Uno dei filtri più comunemente usati nei rilievi di profili di pavimentazioni stradali è la media mobile (moving average): essa definisce la quota del punto  $i$ -esimo del profilo come media delle quote dei punti a ridosso di quello  $i$ -esimo, per una estensione di lunghezza base  $b$  [2]:

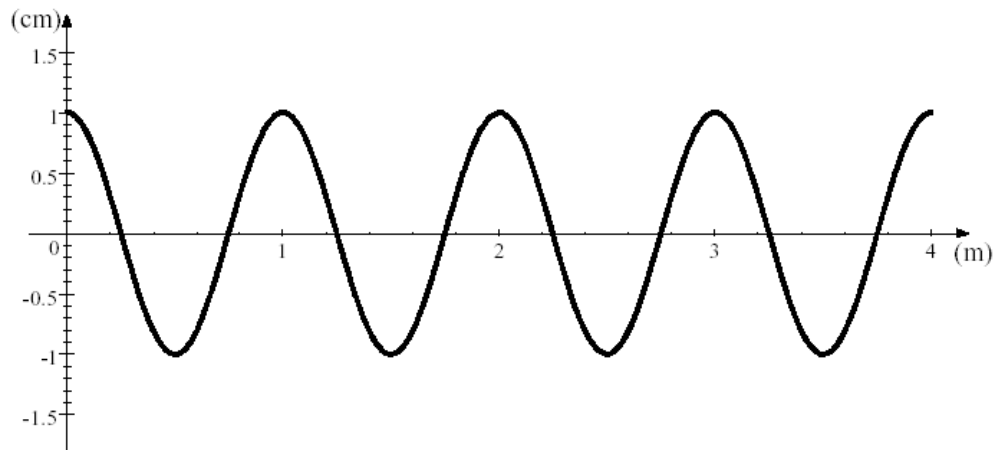
$$z_L(i) = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} z(j)$$

con

$$k = \max \left\{ 1, \left\lceil \frac{b}{2\Delta} \right\rceil \right\}$$

dove  $z$  è la quota rilevata,  $z_L$  la quota filtrata,  $\Delta$  l'intervallo di campionato.

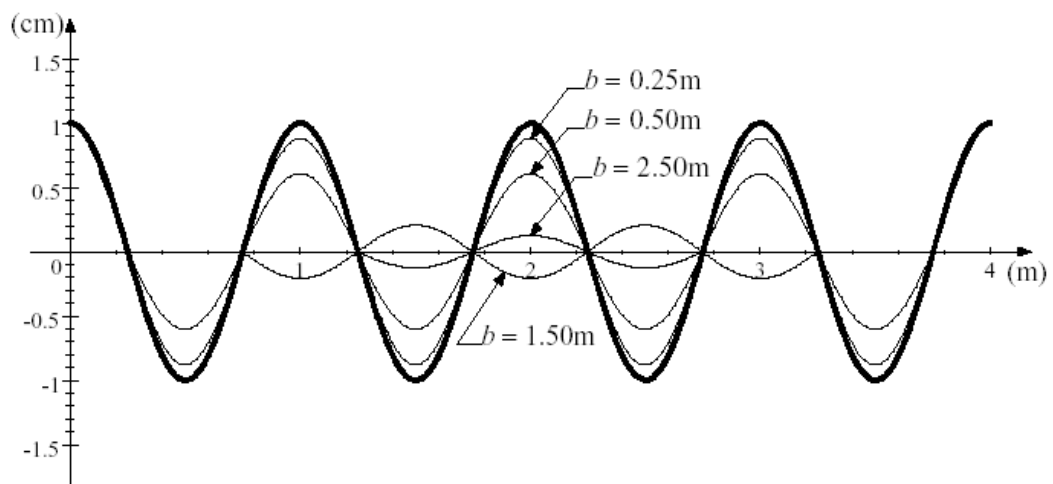
Ad esempio si supponga di aver rilevato un profilo perfettamente sinusoidale, con ampiezza  $A = 1$  cm e lunghezza d'onda  $\lambda = 1$  m, che corrisponde ad una frequenza  $f = 1$  ciclo/m, [2]:



**Fig 2.9** – Profilo sinusoidale di ampiezza  $A$  e lunghezza d'onda  $\lambda$

Si può verificare che la media mobile è un operatore lineare, per cui il profilo filtrato sarà ancora sinusoidale e della stessa lunghezza d'onda.

Nella figura seguente, sono estratte le medie mobili di lunghezza base  $b$  pari a 0.25m, 0.50m, 1.50m, 2.50m. È evidente che le medie mobili di lunghezza base  $b$  pari alla lunghezza d'onda  $\lambda$  della sinusoide o a un multiplo di essa sono identicamente nulle,[2]:



**Fig 2.10** – Medie mobili di un profilo sinusoidale

Dalla figura, risulta che i profili filtrati iniziano dal punto  $k/2 + 1$ esimo, giacché prima non vi sono punti sufficienti per effettuare la media. Analogamente terminano al punto  $k/2 + 1$ esimo prima di quello finale. Si nota inoltre che le ampiezze dei profili si riducono man mano che la lunghezza base  $b$  si approssima alla lunghezza

d'onda  $\lambda$ , fino ad annullarsi per  $b = \lambda$ . Per  $b > \lambda$  il profilo viene cambiato di segno fino a  $2\lambda$ , dove si annulla per poi riprendere periodicamente, [2].

Si comprende quindi che un filtraggio con media mobile di lunghezza base  $b$ , riduce tutte le onde di lunghezza d'onda  $\lambda < b$ , eliminando quelle di lunghezza d'onda  $\lambda \ll b$ , cioè il filtro fa passare solo le onde a bassa frequenza rispetto alla frequenza  $f_b = 1/b$ . Per tali ragioni un filtro del genere si dice filtro passa banda bassa (low-pass filter), e poiché dal filtraggio vengono eliminate le cuspidi ad alta frequenza il profilo che se ne ottiene si dice smussato, come evidenziato dalla figura di seguito, [2]:

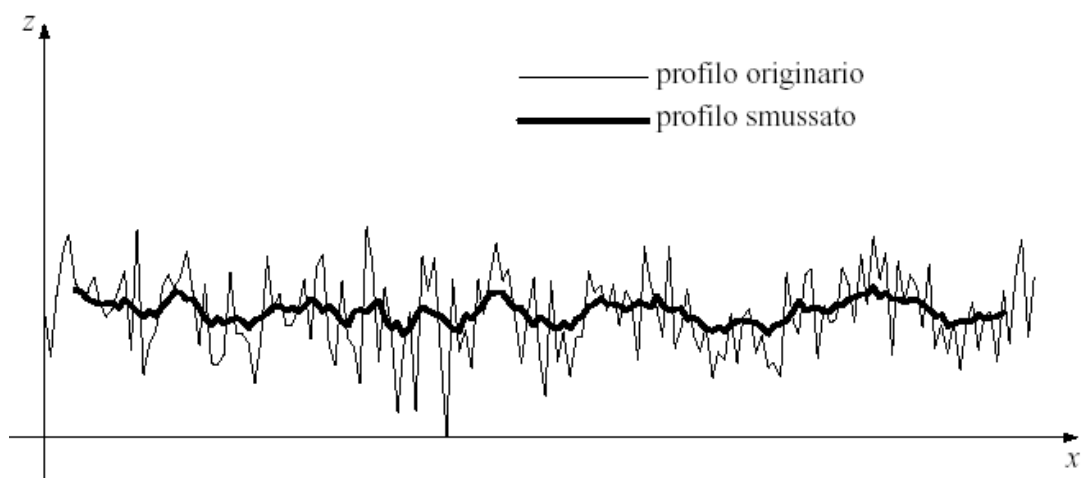


Fig. 2.11 – Profilo smussato di un profilo originario

### 2.3.1.2 FILTRO ANTI MEDIA MOBILE

Un altro filtro adoperato nei rilievi dei profili delle pavimentazioni stradali, chiamato filtro anti-media mobile, si ottiene sottraendo al profilo originario quello ottenuto dalla media mobile, [2]:

$$z_H(i) = z(i) - z_L(i)$$

E' da specificare che tale filtro riduce le ampiezze delle onde di frequenza minore di  $f_b = 1/b$ , eliminando quelle a frequenza molto minore di  $f_b$  e lasciando intatte quelle a frequenza molto maggiore di  $f_b$ .

Per tali motivi l'anti-media mobile viene indicato come filtro passa banda alta (high-pass filter) ed il profilo che se ne ottiene viene detto anti-smussato (anti-smoothing).

Il rapporto fra l'ampiezza del profilo filtrato e l'ampiezza del profilo originario prende il nome di fattore di guadagno del filtro (gain factor), esso rappresenta il modulo della risposta in frequenza dell'operatore di filtraggio, ed è diagrammato in funzione del rapporto  $\frac{b}{\lambda}$ , [2] :

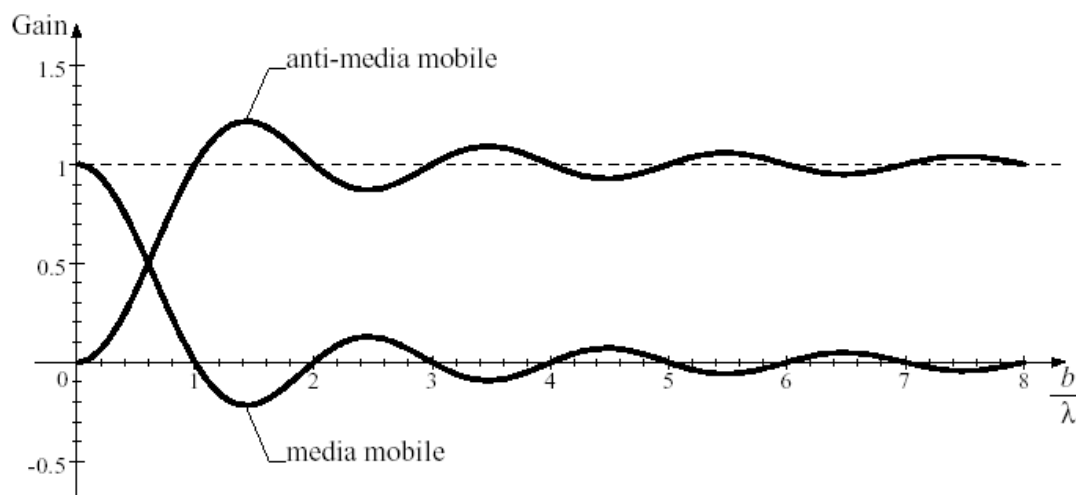


Fig. 2.12 – Gain Factor dei filtri Media mobile ed Anti Media mobile

### 2.3.2 DENSITA' SPETTRALE DI POTENZA DEL PROFILO

Il profilo longitudinale di una superficie stradale può essere ricondotto ad un processo aleatorio stazionario ed ergodico. E' quindi possibile descrivere il profilo stradale attraverso la media di una funzione densità spettrale di potenza (PSD) degli spostamenti verticali del profilo stradale, ottenuta attraverso la trasformata di Fourier della funzione autocorrelazione del processo stocastico che descrive il profilo stradale, [7].

Partendo da un profilo stradale continuo, per un definito valore di frequenza spaziale  $n$ , centrata entro una frequenza di banda  $\Delta n$ , il valore della funzione densità spettrale di potenza per l'assegnata frequenza  $n$ , è definita dall'espressione, [7] :

$$G_d(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(n, \Delta n)}{\Delta n} \quad (1)$$

dove  $\Psi_x^2$  è il valore quadratico medio della componente del segnale alla frequenza spaziale  $n$ , entro la frequenza di banda  $\Delta n$ . In ogni modo, il segnale non è misurato in continuo ma è opportunamente discretizzato, quindi il profilo stradale è descritto da una sequenza di punti in elevazione uniformemente spazati, [7].

Se la lunghezza di un profilo stradale è  $L$  e l'intervallo di campionamento è  $B$ , la teorica frequenza spaziale massima è  $n_{\max} = 1/B$ , l'effettiva frequenza spaziale di campionamento, nel rispetto del teorema di Nyquist, è  $n_{\text{eff}} = n_{\max}/2$  ed i valori discretizzati di frequenza spaziale,  $n_i$ , sono equamente spazati con intervallo di  $\Delta n = 1/L$ . Ricordando che, un profilo arbitrario può essere matematicamente riprodotto attraverso una serie di armoniche, se il profilo è definito con  $n$  punti in elevazione equamente spazati, esso può essere duplicato matematicamente tramite la somma di  $n/2$  sinusoidi.

Alla luce di quanto detto, la formula della PSD può essere scritta in forma discreta, [7]:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n} = \frac{\Psi_x^2(i \cdot \Delta n, \Delta n)}{\Delta n} \quad (2)$$

dove  $i$  varia tra zero e  $n_{\max}/\Delta n = N$ .

Se il profilo stradale è rappresentato attraverso una funzione di campionamento di tipo armonica, con espressione:

$$y(x) = A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi) = A_i \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi) \quad (3)$$

dove  $A_i$  è l'ampiezza,  $n_i$  è la frequenza spaziale e  $\varphi$  è l'angolo di fase, allora è possibile affermare che il valore quadratico medio di questo segnale armonico è:

$$\Psi_x^2 = \frac{A_i^2}{2} \quad (4)$$

Attraverso la formula testé descritta, è possibile affermare che la relazione tra il contenuto spettrale, ottenuto dalla trasformata di Fourier, e la PSD discretizzata di un profilo stradale, può ottenersi tramite l'espressione :

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2 \cdot \Delta n} \quad (5)$$

Bisogna specificare che, i valori di PSD degli spostamenti verticali del profilo stradale per una assegnata frequenza spaziale  $n_i$ , non è direttamente collegata alla ampiezza di Fourier  $A_i$  associata alla stessa frequenza spaziale attraverso l'equazione sovrastante, ma essi dovrebbero essere ottenuti come media dei valori estratti da una significativa popolazione statistica di misurazioni del profilo stradale, sulla quale valutare la trasformata di Fourier, [7].

Una volta nota la PSD degli spostamenti verticali, è possibile generare un profilo stradale artificiale dalla media del rapporto tra il contenuto spettrale e la funzione PSD del profilo stradale. Va sottolineato che nella (5) si è persa ogni possibile informazione riguardante l'angolo di fase, per cui assumeremo come valore di  $\varphi$  quel valore estratto in maniera casuale in una distribuzione uniforme entro l'intervallo  $[0;2\pi]$ . In queste ipotesi, il profilo artificiale può essere descritto attraverso la relazione, [7]:

$$y(x) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi_i) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} \sqrt[2]{2 \cdot \Delta n \cdot G_d(i \cdot \Delta n)} \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi_i) \quad (6)$$

Per la valutazione della regolarità del profilo delle pavimentazioni stradali, la norma ISO 8606 fa riferimento oltre che alla densità spettrale di potenza delle quote verticali  $G_d$  in funzione della frequenza spaziale, anche a quella espressa in funzione della frequenza spaziale angolare  $\Omega$  [rad/m], essendo [8]:

$$\Omega = 2\pi n$$

La valutazione può anche essere effettuata attraverso la PSD della accelerazione  $G_a$ , intesa come variazione di pendenza nell'unità di tempo, attraverso le relazioni [8]:

$$G_a(n) = (2\pi n)^4 G_d(n) \quad (7)$$

$$G_a(\Omega) = \Omega^4 G_d(\Omega) \quad (8)$$

La norma suddivide i profili in otto classi di regolarità, indicate con le lettere dalla A alla H ed individuate dai valori assunti dalla PSD in corrispondenza di una frequenza spaziale convenzionale  $n_0=0.1$  cicli/m oppure in corrispondenza di una frequenza angolare convenzionale  $\Omega_0=1$  rad/m. Alla classe A appartengono le pavimentazioni con il maggior grado di regolarità, alla classe H quelle con il grado peggiore.

Il tutto è espresso dalla tabella sottostante, [8]:

Classe	$G_d(n_0 = 0.1 \text{ cicli/m})$	$G_d(\Omega_0 = 1 \text{ rad/m})$
A	0-32	0-2
B	32-128	2-8
C	128-512	8-32
D	512-2048	32-128
E	2048-8192	128-512
F	8192-32768	512-2048
G	32768-131072	2048-8192
H	131072 - $\infty$	8192 - $\infty$

**Fig. 2.13** –Classi di rugosità delle pavimentazioni stradali secondo la norma ISO 8608

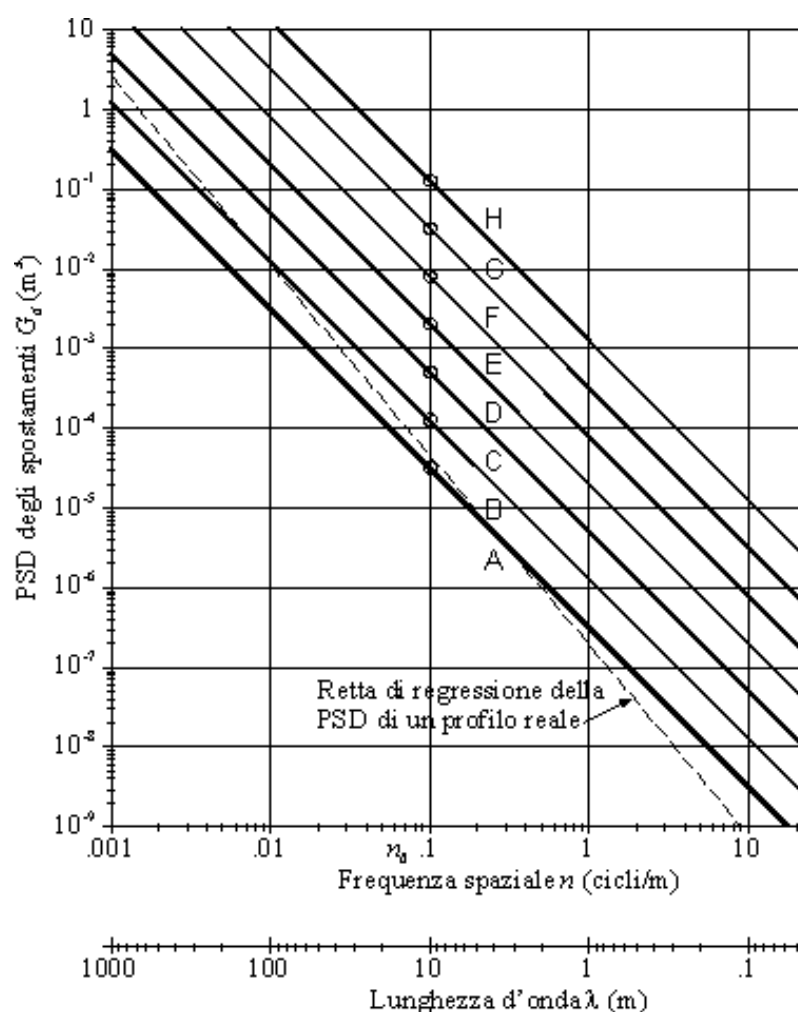
La norma ISO fornisce in oltre le curve di PSD del profilo che suddividono le otto classi di rugosità, e che possono essere ottenute dalla relazione [8]:

$$G_d(n) = G(n_0) \cdot \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-2} \quad (9)$$

$$G_d(\Omega) = G(\Omega_0) \cdot \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-2} \quad (10)$$

dove i valori di  $G_d(n)$  e  $G_d(\Omega)$  sono forniti dalla tabella di figura 2.13.

Il diagramma delle curve suddette è rappresentato nel diagramma seguente, [8]:



**Fig. 2.14** - Classificazione delle pavimentazioni stradali secondo la norma ISO 8608

Sostituendo la ( 9 ) nella ( 6 ), un profilo artificiale attraverso la classificazione ISO può essere generato con la relazione:

$$y(x) = \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} \sqrt[2]{\Delta n} \cdot 2^k \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{n_0}{i \cdot \Delta n} \right) \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi_i) \quad (11)$$

dove  $k$  è funzione delle classi di rugosità della norma ISO ed è riportato nella tabella seguente, [8]:

Road Class	$k$
A Upper limit – B Lower limit	3
B Upper limit – C Lower limit	4
C Upper limit – D Lower limit	5
D Upper limit – E Lower limit	6
E Upper limit – F Lower limit	7
F Upper limit – G Lower limit	8
G Upper limit – H Lower limit	9

**Fig. 2.14** – Valori del coefficiente  $k$  per la generazione del profilo artificiale attraverso la classificazione ISO

### 2.3.2.1 SMUSSAMENTO DELLA PSD

Quando la funzione PSD è calcolata per via discreta con larghezza di banda costante, la sua rappresentazione in un diagramma bilogarithmico evidenzia una forte fluttuazione alle alte frequenze, generata dalla reale distribuzione della potenza e dal “rumore” statistico, [8].

Oltretutto, i profili reali non sempre sono contenuti nei campi definiti dalle curve limite indicate nella Fig. 2.14.

Per tali ragioni, la norma ISO 8608 prescrive di rappresentare la PSD in una forma smussata, calcolandone la media in diverse bande, [8]:

- Bande di ottava: è costituita da un intervallo di frequenze con frequenza centrale pari a  $n_c = 2^i$  ed estremi pari a  $n_l = 2^{i-\frac{1}{2}}$  e  $n_h = 2^{i+\frac{1}{2}}$  con  $i$  qualsiasi numero intero. In tal caso la media va calcolata dalla più bassa frequenza di calcolo della PSD (eccetto zero) fino alla banda di frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{-5}$  cicli/m;



- Bande di terzi di ottava: è costituita da un intervallo di frequenze con frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{\frac{i}{3}}$  ed estremi pari a  $n_l = 2^{\frac{i}{3}-\frac{1}{6}}$  e  $n_h = 2^{\frac{i}{3}+\frac{1}{6}}$ . In tal caso la media va calcolata dall'ultima banda di ottava fino alla banda di frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{-\frac{6}{3}} = 0.25$  cicli/m;
- Bande di dodicesimi di ottava: è costituita da un intervallo di frequenze con frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{\frac{i}{12}}$  ed estremi pari a  $n_l = 2^{\frac{i}{12}-\frac{1}{24}}$  e  $n_h = 2^{\frac{i}{12}+\frac{1}{24}}$ . In tal caso la media deve essere calcolata dalla banda con frequenza centrale pari a  $n_c = 2^{\frac{22}{12}} = 0.2806$  cicli/m fino alla più alta frequenza di calcolo della PSD.

Come la norma avverte, così facendo si crea una piccola sovrapposizione di bande fra l'ultima banda di terzi di ottava (con limite superiore pari  $n_h = 2^{\frac{6}{3}+\frac{1}{6}} = 0.2806$  cicli/m) e la prima banda di dodicesimi di ottava (con limite inferiore pari a  $n_l = 2^{\frac{22}{12}-\frac{1}{24}} = 0.2726$  cicli/m), con effetti però irrilevanti [8].

La media della PSD in una definita banda di intervallo ( $n_l$  ,  $n_h$ ) dovrebbe essere calcolata nel modo seguente:

si individua la PSD come una serie di valori, indicizzati da 0 ( PSD(0)=G(0) ) all'ultimo valore (PSD(N)=G(N) ): all'indice 0 corrisponderà il valore di PSD di frequenza  $n = 0$ , mentre all'indice N corrisponderà il valore di PSD di più alta frequenza  $n_{\max}$  (ad esempio, se si calcola la PSD utilizzando la FFT,  $n_{\max}$  sarà pari alla metà della frequenza di campionamento);

si individuano gli indici  $n_L$  ,  $n_H$  corrispondenti alle frequenze limite della banda:

$$n_L = \text{Int}\left(\frac{n_l}{B_e} + 0.5\right)$$

$$n_H = \text{Int}\left(\frac{n_h}{B_e} + 0.5\right)$$

essendo  $B_e$  la risoluzione in frequenza con cui la serie di PSD è fornita (la differenza in modulo fra la frequenza di un valore di PSD e la frequenza del valore successivo);

si calcola la media della PSD nella banda suddetta dalla espressione seguente:

$$G_S = \frac{(n_L + 0.5)B_e - n_l}{n_h - n_l} G(n_L) + \frac{1}{n_h - n_l} \sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j)B_e + \frac{n_h - (n_H - 0.5)B_e}{n_h - n_l} G(n_H)$$

avendo indicato con  $G(i)$  il valore della PSD con indice  $i$  e con  $G_S$  il valore medio (smussato) della banda [8].

Calcolata la PSD smussata, se ne può estrarre una retta di regressione in scala bilogarithmica, con espressione del tipo, [8]:

$$G(n) = G(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{-w}$$

$$G(\Omega) = G(\Omega_0) \left( \frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w}$$

dove  $n_0 = 0.1$  cicli/m,  $\Omega_0 = 0.1$  rad/m e  $w$  è l'esponente della regressione della PSD.

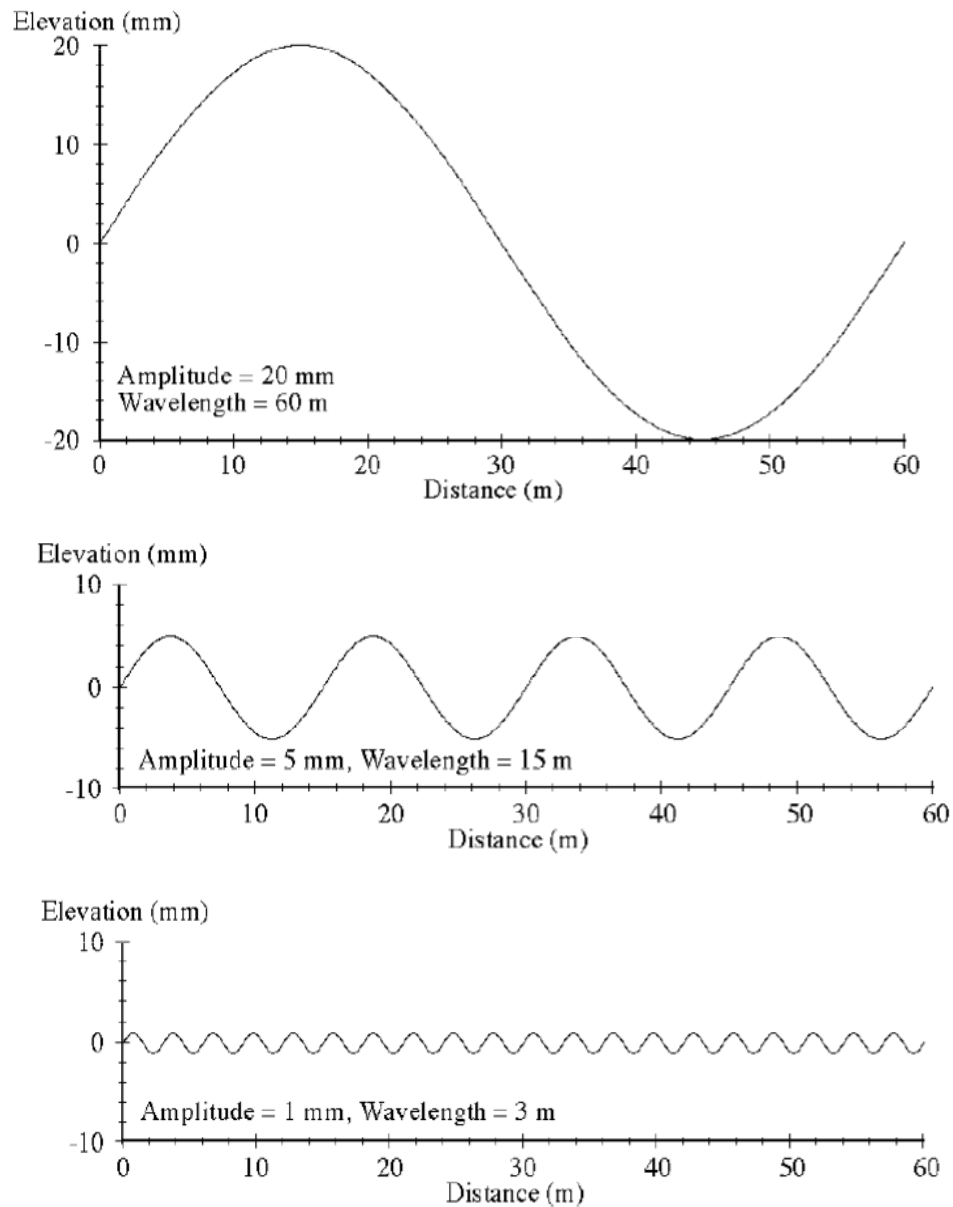
Se la retta di regressione è calcolata sulla PSD delle accelerazioni, l'esponente delle espressioni scritte sarà  $w' = w - 4$ .

Il diagramma della PSD smussata e della sua retta di regressione in scala bilogarithmica, sono più facilmente leggibili e meglio collocano la pavimentazione fra le otto classi fornite dalla norma (vedi Fig.2.14 ).

### 2.3.3 ACCELERAZIONE VERTICALE RELATIVA AL PROFILO

Come già esposto nel paragrafo precedente, per classificare la regolarità della superficie stradale possiamo far riferimento sia alla PSD delle quote verticali che alla PSD dell'accelerazione spaziale (teoria formulata da Bruscella nel 1999 e meglio esposta in seguito).

E' quindi importante capire la relazione esistente tra il profilo in elevazione e l'accelerazione. A tal scopo, consideriamo le tre sinusoidi riportate di seguito [2]:



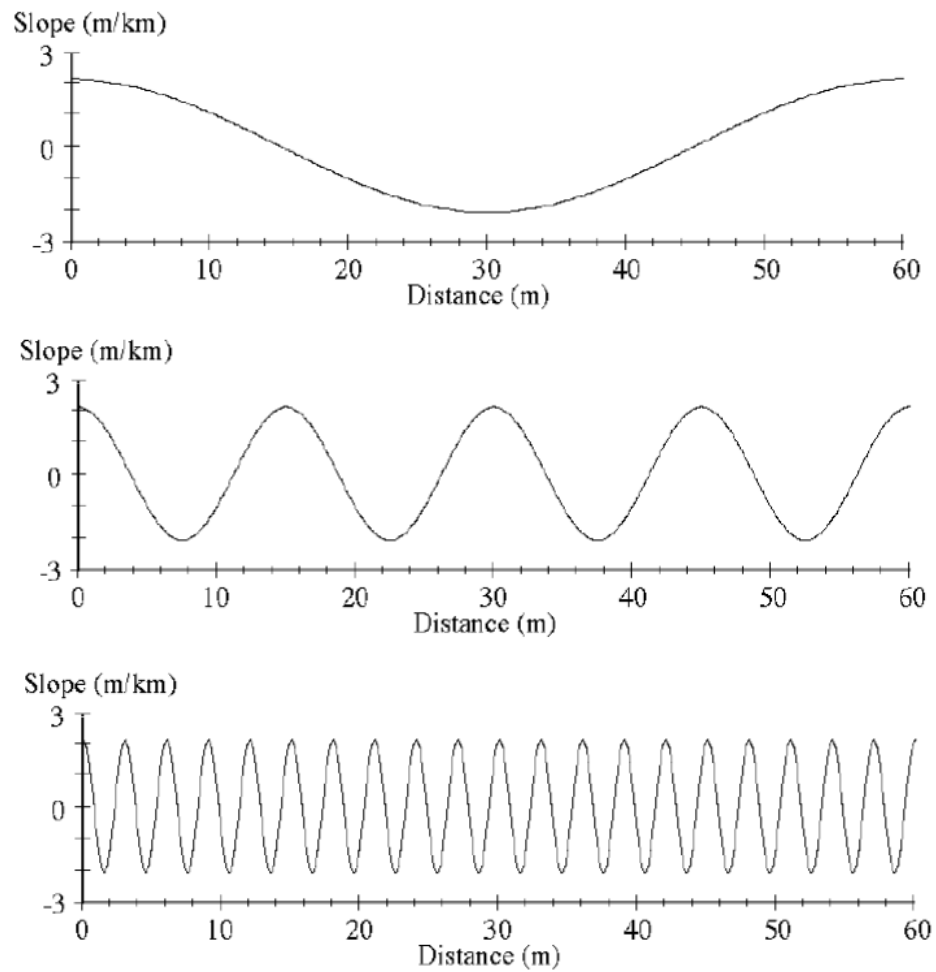
**Fig. 2.15** – Sinusoidi con diverse lunghezze d’onda ed ampiezze

La derivata di una sinusoida è ancora una sinusoida con la stessa lunghezza d’onda e con ampiezza generalmente diversa. L’ampiezza della derivata di una sinusoida è pari a, [2]:

$$\frac{2\pi A}{\lambda} \quad (12)$$

dove  $A$  e  $\lambda$  sono ampiezza e lunghezza d’onda del segnale originale.

Quindi le derivate delle tre sinusoidi precedentemente indicate sono ancora sinusoidi con stessa lunghezza d’onda di quella di partenza, ma la formula fornisce per ciascuna delle tre sinusoidi la medesima ampiezza della derivata, [2]:



**Fig. 2.16** – Derivate delle sinusoidi di Fig. 2.15

Il processo di derivazione può essere applicato una seconda volta per generare l'accelerazione spaziale.

La frequenza della sinusoide sarà quindi pari a:

$$f = \frac{V}{\lambda} = Vv$$

con  $f$  espresso in cicli/s,  $V$  in m/s,  $\lambda$  lunghezza d'onda misurata in m/cicli ed  $v$  che ha le dimensioni di 1/Lunghezza.

I risultati ottenuti per l'esempio esposto, possono essere estesi a tutto lo spettro di frequenze ( o numeri d'onda ) presente in una tipica superficie stradale.

Considerando ad esempio una superficie stradale rappresentata attraverso la PSD delle quote verticali, quando la velocità di crociera è di 80 Km/h, derivando una volta si ottiene lo spettro delle velocità e derivando ancora si ricava la PSD in termini di accelerazione spaziale, [2].

---

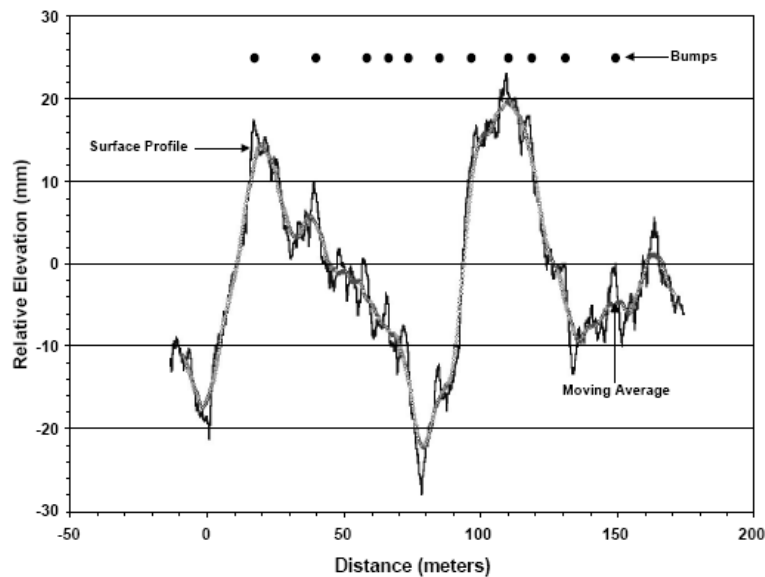
### 2.3.4 METODOLOGIE DI TRATTAZIONE DELLE IRREGOLARITA' PUNTUALI

I profili misurati quasi mai possono essere assimilati a processi aleatori stazionari ed ergodici ma possono essere ricondotti a tali modelli se si riesce ad estrarre le componenti di tipo “transiente” relative alle cosiddette irregolarità localizzate applicando successivamente opportuni algoritmi di segmentazione per la individuazione di tratte omogenee [11].

In effetti, il profilo longitudinale della pavimentazione può essere visto come sovrapposizione di una componente transiente legata alla presenza di irregolarità localizzate o singolari come buche, rappezzi, avvallamenti, chiusini depressi, dossi rallentatori, etc. e di una componente che può essere scomposta in una successione di tratte stazionarie [11]. Pertanto il profilo digitalizzato deve essere depurato dalle suddette irregolarità concentrate e successivamente ridotto in una serie di tratte stazionarie. A tal proposito, vale la pena ricordare che diversi algoritmi sono stati proposti nella letteratura tecnica per l'individuazione dei transienti quali quelli che impiegano dei filtri a media mobile [9] o con assegnate frequenze di taglio [10], la radice del valore quadratico medio delle accelerazioni spaziali del profilo [11] o l'analisi attraverso le Wavelet [12]. Esiste inoltre una consolidata letteratura sugli algoritmi di identificazione delle tratte omogenee che possono anche essere proficuamente utilizzati per la individuazione delle tratte stazionarie.

Una prima metodologia che si può applicare per la ricerca delle irregolarità puntuali è quella che utilizza la media mobile del profilo superficiale [9]. I dati di profilo, acquisiti attraverso attrezzatura profilometrica, devono essere prelevati in corrispondenza delle wheel-path.

I profili destro e sinistro delle wheel-path vengono poi successivamente mediati, di modo da pervenire ad un unico profilo. Sul profilo così ottenuto si va poi ad applicare un filtro media mobile con base di 7.62 m, così facendo si ottiene un profilo addolcito da confrontare con il profilo reale. Infatti, le irregolarità puntuali vengono localizzate nei punti in cui la deviazione tra profilo iniziale e profilo filtrato è significativa [9].



**Fig. 2.17** – Individuazione delle irregolarità tramite confronto del profilo di partenza con la media mobile

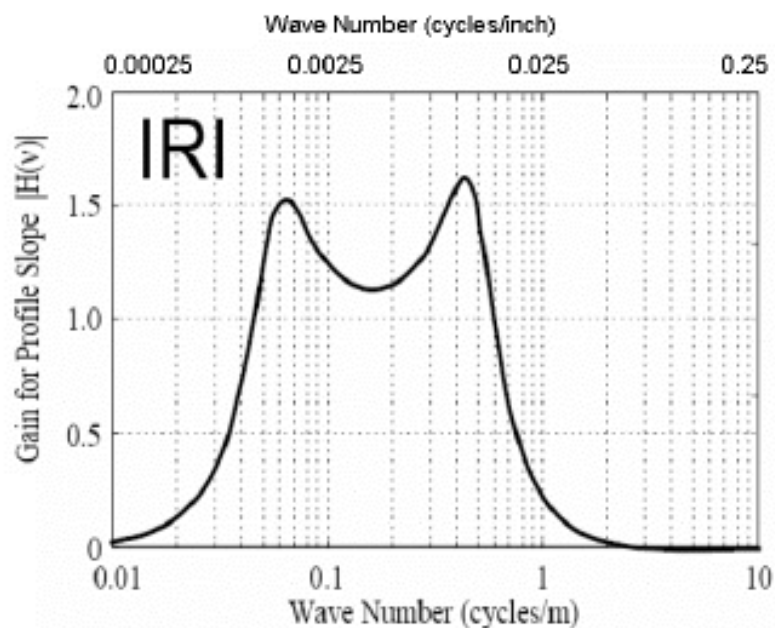
Una evoluzione di questo metodo, è quello che perviene alla localizzazione delle irregolarità puntuali sempre attraverso il confronto del profilo misurato con uno addolcito, calcolato però questa volta grazie a considerazioni sul Gain dell'IRI [10].

Matematicamente un profilo stradale può essere rappresentato dalla composizione di un certo numero di sinusoidi. Così il profilo stesso può essere rappresentato nel dominio delle frequenze, utilizzando le ampiezze e le lunghezze d'onda delle sinusoidi che compongono il profilo.

Per determinare lo spettro, si va a calcolare la Discrete Fourier Transform del profilo, che ci permette di valutare il contenuto in frequenza del profilo e stabilisce le frequenze delle sinusoidi, e le rispettive ampiezze d'onda, che compongono il profilo.

Analogamente è possibile passare dal dominio delle frequenze al dominio delle distanze partendo dallo spettro del profilo ed applicando una Antitrasformata di Fourier. In particolare, se dallo spettro del profilo misurato si vanno ad eliminare le ampiezze d'onda corrispondenti ad alcune frequenze, lo spettro risulterà differente da quello di partenza, per cui andando ad applicare l'Antitrasformata di Fourier si perverrà ad un profilo differente da quello misurato. Per quanto riguarda i profili delle pavimentazioni stradali, solo le sinusoidi comprese all'interno di un certo intervallo sono responsabili della irregolarità. Se le ampiezze di queste sinusoidi vengono attenuate o cancellate, da questo spettro modificato si perviene ad un profilo smussato con una irregolarità ridotta. La frequenza in corrispondenza della quale rimuovere le ampiezze d'onda dallo spettro

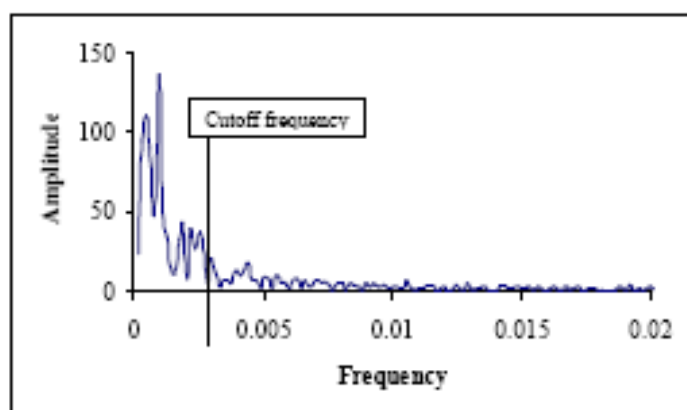
del profilo può essere individuata in vari modi, ad esempio utilizzando una metodologia che utilizza la funzione Gain dell'IRI [10].



**Fig 2.18** - Gain dell'IRI.

Come è evidenziato dalla figura, l'IRI è maggiormente influenzato dalle lunghezze d'onda comprese nell'intervallo da 0.045 cicli/m a 0.6 cicli/m; infatti all'interno di questo intervallo il Gain dell'IRI è sistematicamente maggiore di 1. Quindi, per determinare il profilo addolcito desiderato, è ipoteticamente possibile rimuovere tutte le frequenze al di sopra di 0.045 cicli/m, generando poi un profilo smussato andando a calcolare l'Antitrasformata di Fourier dello spettro.

Quindi per generare un profilo smussato è necessario rimuovere le sinusoidi al di sopra di una certa frequenza denominata cutoff frequency [10].



**Fig 2.19** - Individuazione della frequenza di taglio all'interno dello spettro del profilo.

Nel lavoro di Fernando [10], si è fatta variare la frequenza di taglio all'interno di un intervallo compreso tra 0.0013 e 0.0025 cicli/in (corrispondenti a 0.05 e 0.1 cicli/m). Diversi profili smussati sono stati calcolati al variare della frequenza di taglio, scegliendo poi di assumere come valore di default per la cutoff frequency quello di 0.0019 cicli/in (corrispondente a 0.6 cicli/m), che rappresenta il valor medio dell'intervallo sopraindicato.

Ottenuto così il profilo addolcito desiderato, possiamo individuare le irregolarità puntuali confrontando lo stesso con il profilo misurato di partenza, e classificando come possibili singolarità tutti quei punti in cui lo scarto relativo tra i due profili supera in valore assoluto i 3.81 mm (corrispondenti ai 0.150 in indicati in [10]).

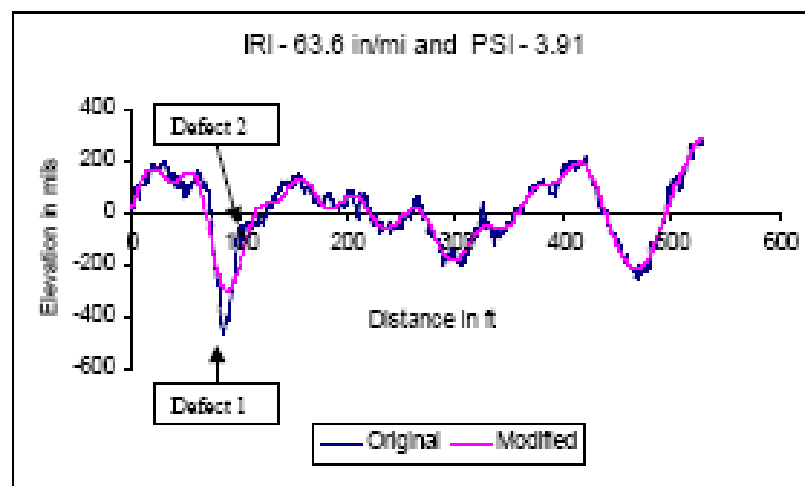


Fig 2.20 - Profilo originale e profilo modificato ed individuazione dei difetti.



---

## 2.3.5 ANALISI DEL PROFILO STRADALE TRAMITE

### L'ACCELERAZIONE SPAZIALE

Dodds e Robson furono i primi studiosi ad interessarsi in maniera diffusa dello studio delle superfici stradali, essi affermarono (1973) che una superficie stradale potesse essere considerata come un processo casuale omogeneo ed isotropo con distribuzione di tipo Gaussiana e che un singolo tracciato di funzione densità spettrale di potenza (PSD stimata) potesse essere usata per generare una completa descrizione dell'intera superficie stradale; in oltre asserirono che la pendenza della PSD fosse indipendente dalla superficie stradale e funzione solo del RMS della strada, [12].

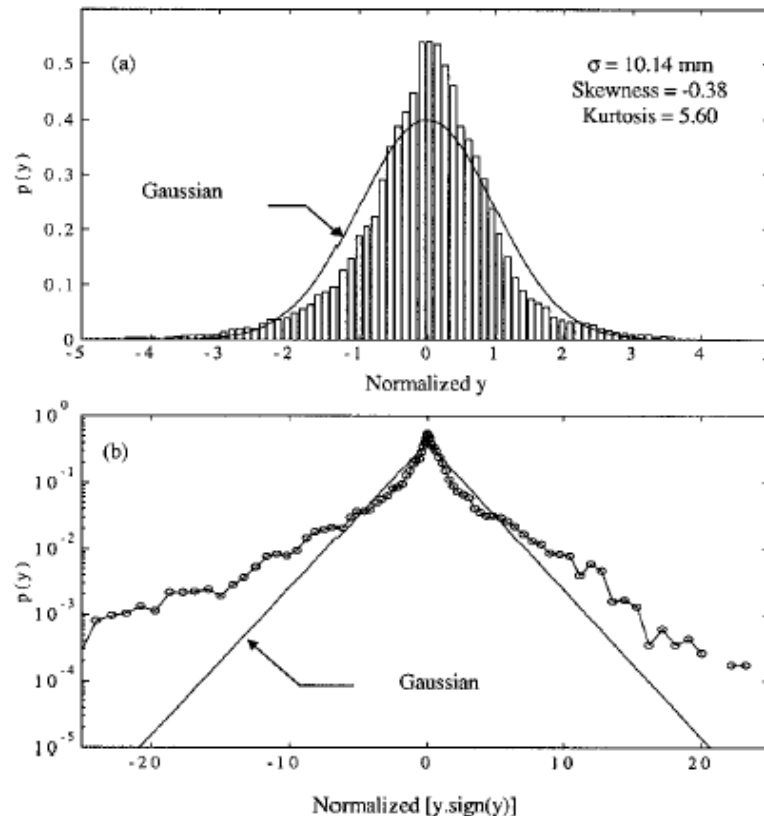
Numerosi esperimenti hanno evidenziato che la rugosità potesse essere modellizzata come un processo casuale con distribuzione Gaussiana a media zero nel dominio spaziale che diventa un processo aleatorio ergodico e stazionario nel dominio del tempo, se la misura è effettuata con un dispositivo che si muove a velocità costante (Newland 1984, Zhu 1992), [13].

Ulteriori ricerche sostenute da Heath (1988) dimostrarono che anche se le superfici stradali non danno luogo a fenomeni completamente omogenei o stazionari, sicuramente alcune sezioni di tale superficie potranno essere considerate stazionarie [12]; in pratica, come meglio si capirà in seguito, si suddivide la superficie stradale in tronchi con RMS costante, [14].

Vogel (1965) fu invece il primo studioso ad affermare che le valutazioni spettrali del profilo stradale fossero indipendenti dal tipo di strada ma fosse funzione della radice quadratica media (RMS) del livello di rugosità superficiale, [14].

Successivamente, Bruscella (1999) e Rouillard (2000) mostrarono come la distribuzione statistica di una superficie stradale tipo deviasse dalla Gaussiana ed avanzarono la necessità di individuare uno stimatore più adatto a descrivere l'analisi dinamica dei veicoli, [14].

Quando la PSD è usata come unico mezzo per la descrizione della superficie stradale, si assume che il segnale abbia una distribuzione Gaussiana e che tutti gli eventi statisticamente rari, quali quelli transitori, siano trascurabili, [12].



**Fig 2.21** – PDF per la valutazione del profilo in elevazione di una superficie stradale a) scala lineare - b) scala semilogaritmica

La figura 3.17 (a) indica la funzione densità di probabilità di una superficie stradale e l'equivalente curva Gaussiana basata su media e deviazione standard, [12].

La figura 3.17 (b), invece, mostra la PDF su scala semilogaritmica e rivela la presenza di eventi ad elevata ampiezza (grande RMS) nel segnale al di fuori della distribuzione Gaussiana, [12].

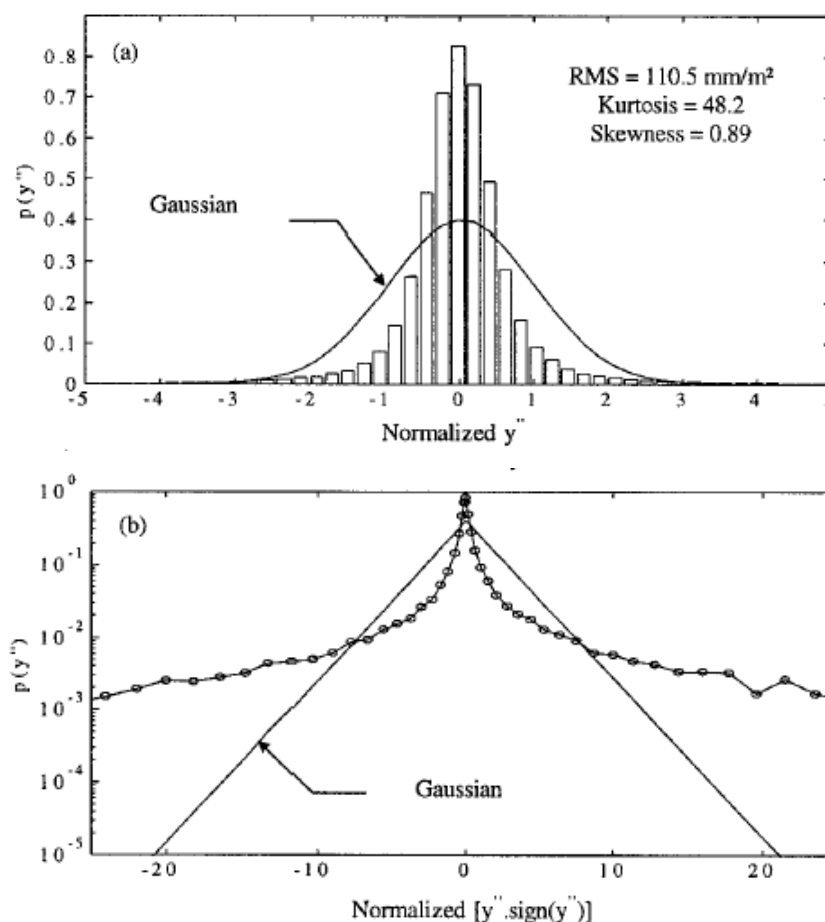
I valori della Kurtosis (che dà un'indicazione di quanto la distribuzione è “allungata” rispetto alla Gaussiana) e della Skewness (parametro esplicativo della asimmetria della distribuzione) espressi in figura, indicano la natura non Gaussiana del processo probabilmente dovuta alla non stazionarietà degli effetti, mentre la PSD e la PDF di un processo aleatorio sono validi, per rappresentare un profilo stradale, solo se il segnale è stazionario, [12]. Il calcolo della PSD e PDF di un segnale non stazionario sarà distorto in funzione del grado di non stazionarietà (Bendat and Piersol 1986), [12].

Bruscella (1996) e Rouillard (2000) mostrarono che la funzione densità di probabilità PDF di un profilo stradale spesso differisce dalla distribuzione Gaussiana e dimostrarono che alti valori di Kurtosis sono indicativi della natura non Gaussiana del

processo dovuta alla non stazionarietà degli effetti, come, ad esempio, RMS variabile e transitorio, [14].

Bruscella dimostrò l'imperfezione del metodo di analisi del profilo basato sulle quote verticali e propose che l'analisi del profilo stradale fosse basata sull'accelerazione spaziale, [14].

La caratteristica non Gaussiana del profilo stradale relativo alle quote in elevazione, resta tale anche dopo che è stata effettuata la conversione nel dominio delle accelerazioni spaziali, ciò può essere facilmente evinto dall'analisi dei grafici sottostanti che risultano del tutto affini a quelli di Fig 2.21, [12] :



**Fig 2.22** – PDF per la valutazione del profilo di una superficie stradale nel dominio delle accelerazioni spaziali - a) scala lineare - b) scala semilogaritmica

Il diagramma della PDF mostra che eventi transitori cadono estremamente al di fuori della distribuzione Gaussiana, [12].

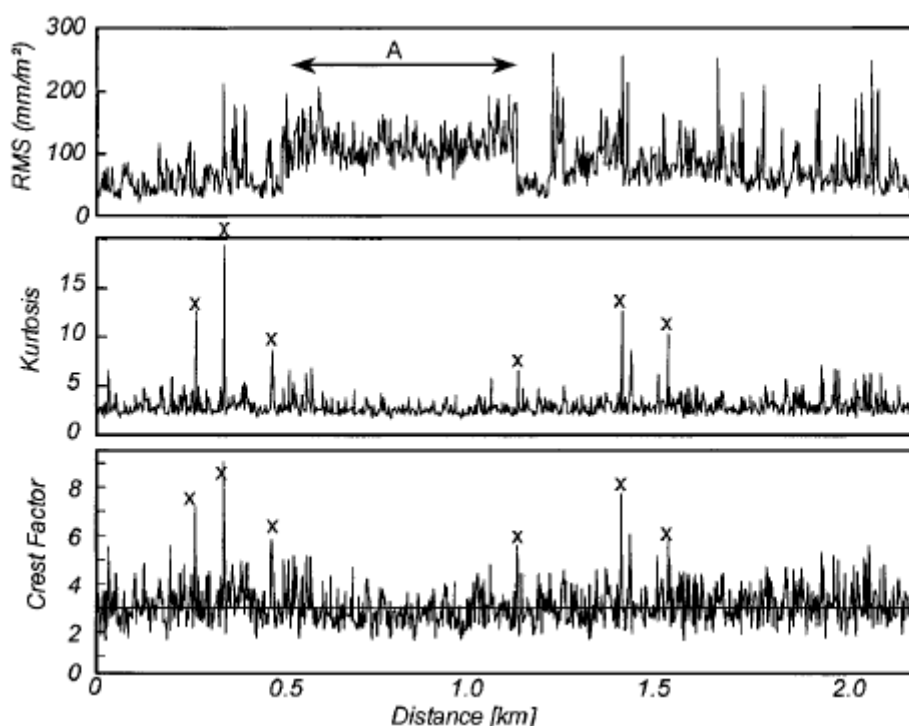
Bruscella analizzò le superfici stradali nel dominio delle accelerazione spaziali e siccome il processo di derivazione mantiene soltanto quegli eventi che sono significativi

per la dinamica del veicolo, possono quindi essere analizzati separatamente dalla superficie stradale sottostante, [14].

E' il caso di sottolineare ulteriormente che, quando la PSD è utilizzata come unico elemento descrittivo della superficie stradale, il segnale, se random, deve essere assunto stazionario, avere una distribuzione Gaussiana e non avere eventi transitori, [14]. Conseguentemente, per avere una completa descrizione delle caratteristiche di irregolarità della superficie stradale, i valori di estremità devono essere analizzati separatamente, [14].

La non stazionarietà e non gaussianità delle caratteristiche di un profilo stradale sono rivelati dalla figura 2.23, nella quale sono riportati RMS, curva di frequenza e fattore di cresta dell'accelerazione spaziale per una sezione stradale tipo, [14].

Anche la non stazionarietà del RMS è una caratteristica che si mantiene pure dopo l'avvenuto passaggio al dominio delle accelerazioni spaziali.



**Fig. 2.23** – RMS, Curva di frequenza e Fattore di cresta dell'Accelerazione Spaziale

La non stazionarietà del RMS è evidente dalla grande e continua variazione dei valori dello stesso RMS [14], quindi per poter definire un processo come stazionario è necessario che esso presenti un RMS pressoché costante nel dominio del tempo od, equivalentemente, nel dominio delle accelerazioni spaziali, [12].

---

Il fatto che valori elevati di kurtosis siano occasionali, è indicativo della transitorietà del segnale [14]. Osservando, inoltre, che la maggioranza dei valori di kurtosis sono approssimativamente tre, è corretto affermare che sezioni che presentano caratteristiche di transitorietà possono essere ugualmente trattate come se avessero distribuzione Gaussiana, [12], [14].

E' interessante notare che la regione con valori considerevolmente alti di RMS, denominata A, corrisponde a bassi valori di curva di frequenza e fattore di cresta [14].

Ciò indica che le sezioni stradali con elevato RMS dell'accelerazione spaziale non necessariamente contengono transitorietà, ma saranno certamente funzione del sottostante livello di RMS, [14].

In conclusione quindi, si può affermare che un importante vantaggio della trasformazione del dominio delle quote superficiali in quello delle accelerazioni spaziali è che eventi transitori sono più facilmente identificabili, [12].

## **2.4 PARAMETRI DESCRITTIVI RAPPRESENTATIVI DEL PROFILO: INTERNATIONAL ROUGHNESS INDEX**

La definizione di un parametro che individui univocamente la regolarità delle pavimentazioni stradali, è di fondamentale importanza per la classificazione delle pavimentazioni. In passato, diversi indici sono stati proposti, in relazione a specifiche problematiche, con l'intento di individuare un indicatore della regolarità stradale che fornisse direttamente il livello relativo al fenomeno in studio, ma l'aspetto che più ha suscitato attenzioni è l'oscillazione del veicolo che viaggia su una pavimentazione non regolare, per l'analisi sia del carico dinamico trasmesso alla pavimentazione, sia della oscillazione dell'abitacolo. Il primo aspetto si correla direttamente al danno arrecato alla pavimentazione stradale, il secondo al comfort di marcia, per quanto riguarda gli autoveicoli, e all'integrità della merce trasportata, per quanto riguarda gli autocarri. La definizione di un indice di tali caratteristiche è stato proposto dalla World Bank nel 1986, e denominato International Roughness Index (IRI) [15]. L'IRI viene definito come il rapporto fra la somma degli spostamenti relativi veicolo-ruota assunti da un veicolo standard che viaggia alla velocità di 80km/h lungo un percorso stradale e la lunghezza di tale percorso, [16].

Sayers e Karamihas [2] hanno proposto un grafico, riportato di seguito, in cui il livello di IRI è messo in relazione alle caratteristiche superficiali e di degrado delle pavimentazioni:

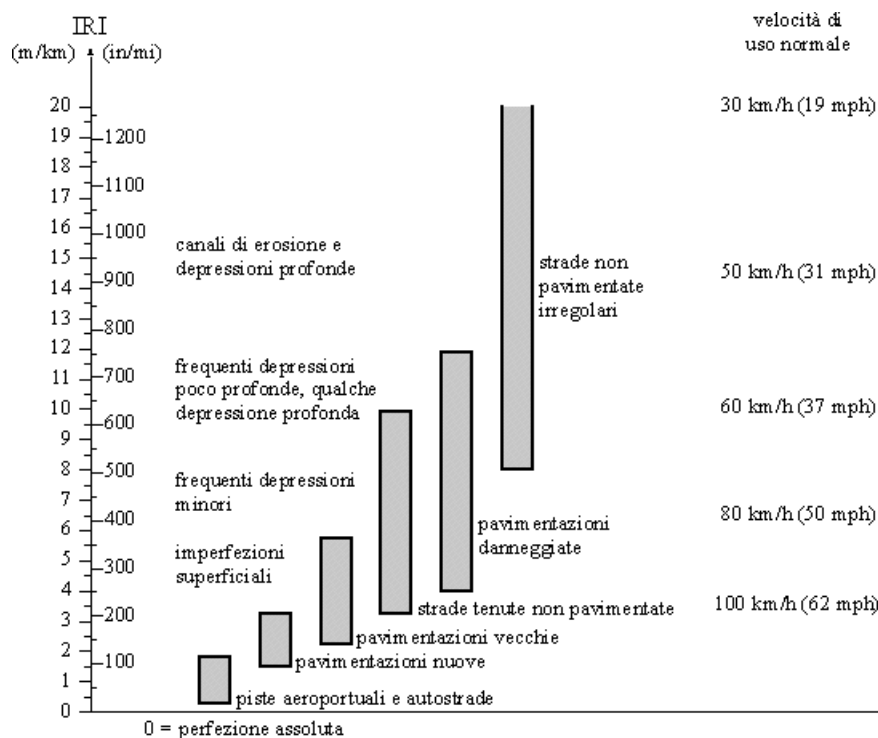


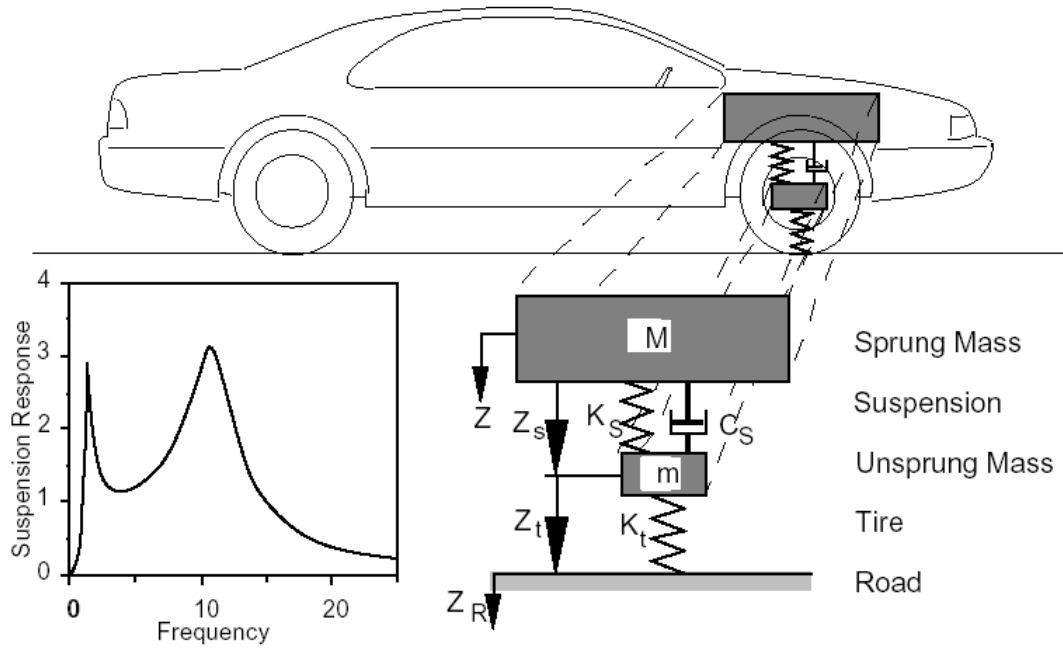
Fig. 2.24. - Caratteristiche delle pavimentazioni stradali in funzione dell'IRI [Sayers 1997]

## 2.4.1 MODELLO DEL QUARTO DI VEICOLO

Per il calcolo dell'indice IRI, risulta necessario definire un veicolo standard di riferimento, [2].

Tale veicolo, per motivi di semplificazione del procedimento di calcolo dell'indice, è stato individuato nel modello quarto di veicolo (quater-car model) raffigurato in Fig2.25. Tale modello, schematizza il veicolo con una massa sospesa ed una massa non sospesa, collegate tra loro da un ammortizzatore ed una sospensione, identificata in una molla con una propria costante elastica, e connesse al suolo attraverso lo pneumatico, semplificato anch'esso con una molla di opportuna costante elastica, [2].

Se la rugosità superficiale è vista come deviazione in elevazione, pendenza o variazione di pendenza, il modello quarto di veicolo risponderà in una definita maniera, [17].



**Fig. 2.25 – Quater Car Model**

La risposta di tale sistema, è descritto matematicamente in maniera completa da un sistema di equazioni di equilibrio della massa sospesa e dell'equilibrio globale, noto come simulazione del quarto di veicolo, [18]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{z}_s m_s + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s (z_s - z_u) = 0 \\ -\ddot{z}_s m_s + \ddot{z}_u m_u + k_t (z_u - z_p) = 0 \end{array} \right.$$

dove i simboli utilizzati rappresentano:

$z_s$  = quota della massa sospesa (*sprung mass*) relativa alla posizione di equilibrio statico,  
 $z_u$  = quota della massa non sospesa (*unsprung mass*) relativa alla posizione di equilibrio statico,

$z_p$  = quota della pavimentazione rispetto ad un punto fisso,

$m_s$  = massa sospesa,

$m_u$  = massa non sospesa,

$k_s$  = costante elastica della sospensione,

$k_t$  = costante elastica della ruota (*tire*),

$c_s$  = costante di smorzamento dell'ammortizzatore.

Il sistema di due equazioni differenziali del secondo ordine può essere semplificato normalizzando i parametri  $m_u$ ,  $k_t$ ,  $k_s$ ,  $c_s$  rispetto alla massa sospesa  $m_s$ , secondo le posizioni, [18]:

$$\mu = \frac{m_u}{m_s}, \quad k_1 = \frac{k_t}{m_s}, \quad k_2 = \frac{k_s}{m_s}, \quad c = \frac{c_s}{m_s}$$

Per cui, il sistema in esame si trasforma in un sistema di quattro equazioni differenziali del primo ordine che in forma matriciale può esprimersi come:

$$\dot{x} = Ax + Bz_p$$

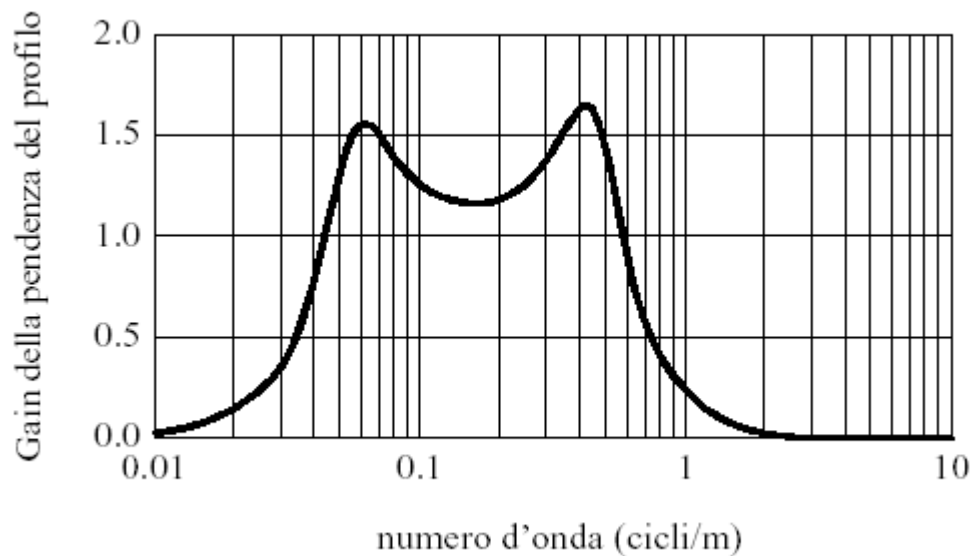
dove il vettore  $x$  rappresenta il vettore delle variabili di stato, cioè quelle variabili che sono necessarie a definire completamente lo stato del sistema.

Per il veicolo standard utilizzato nella definizione dell'IRI, sono stati assunti i valori medi dei veicoli americani, ottenendo ciò che viene chiamata Golden Car, [2].

Essa presenta i seguenti valori dei coefficienti riferiti al quarto di veicolo:

$$c = 6.0s^{-1}, \quad k_1 = 653s^{-2}, \quad k_2 = 63.3s^{-2}, \quad \mu = 0.15$$

La risposta in frequenza del quarto di veicolo è riportata di seguito, [2]:



**Fig. 2.26** – Risposta in frequenza del quarto di veicolo

Si noti che la risposta è minore di 0.5 per frequenze minori di 0.035 cicli/m e maggiori di 0.75 cicli/m; a frequenze ancora più basse la risposta è zero, in quanto ruota e corpo del veicolo si muovono simultaneamente.

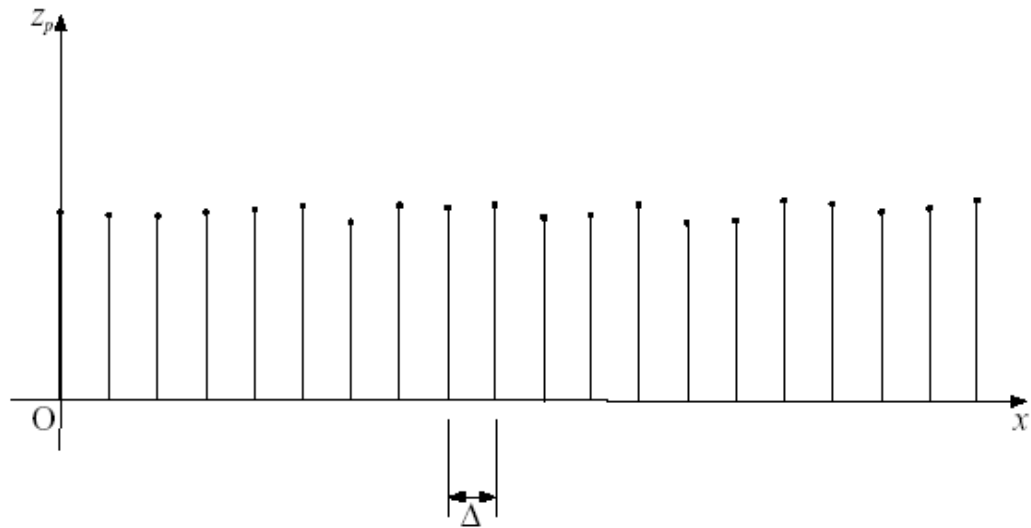
## 2.4.2 PROBLEMATICHE NEL CALCOLO DELL'IRI

Una precisazione deve essere fatta in merito alla quota della pavimentazione  $z_p$ . Tale quota viene rilevata tramite apparecchiature profilometriche, esso rileva la quota di



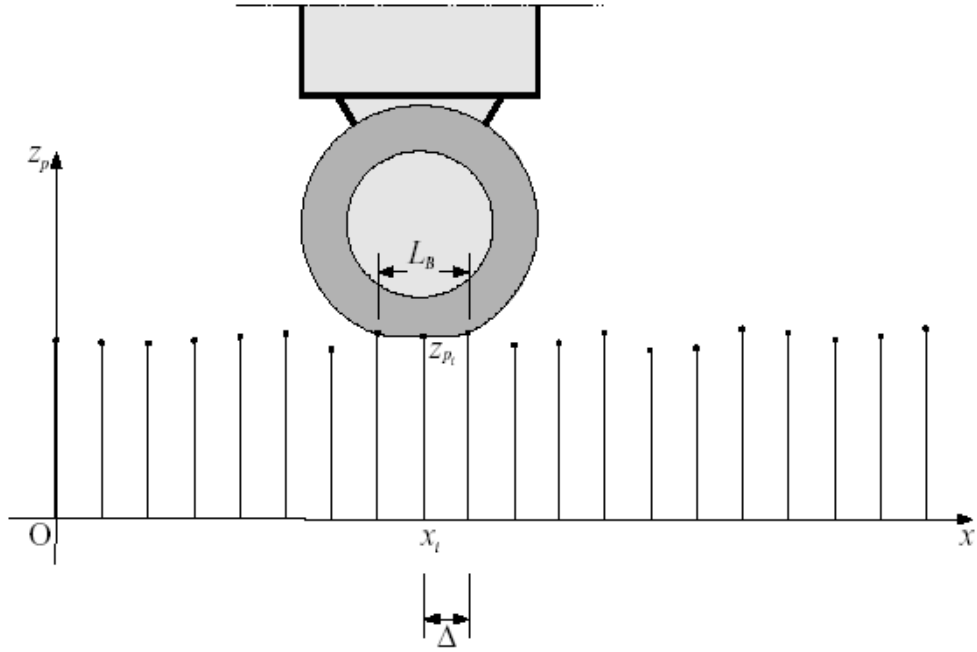
punti della pavimentazione, equamente distanziati di un passo  $\Delta$ , lungo un prestabilito percorso.

Il diagramma del profilo così rilevato si presenta come in figura, [16]:



**Fig. 2.27** – Diagramma del rilievo di un profilo di pavimentazione stradale

Nascono in tal modo due questioni: la prima è quale sia la migliore approssimazione al profilo vero utilizzando i dati rilevati; la seconda è che l'impronta del pneumatico è assunta, per la standardizzazione, di lunghezza  $L_B \approx 250$  mm, e pertanto la configurazione del quarto di veicolo per  $\Delta < L_B$  dipende non solo dalla quota  $z_{pi}$  relativa alla posizione  $x_i$  lungo x dell'asse della ruota, ma anche delle quote dei punti adiacenti e coperti dall'impronta della ruota come mostrato dalla figura seguente, [16]:



**Fig. 2.28** – Influenza delle quote adiacenti sulla configurazione del quarto di veicolo

Queste due questioni vengono parzialmente tenute in conto dall'assunzione del profilo smussato, che definisce la quota  $z_{ps}$  di ogni punto come media delle quote  $z_p$  dei punti successivi a distanza minore della larghezza  $L_B$  dell'impronta del pneumatico, cioè:

$$z_{psi} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{j=i}^{i+k-1} z_{pj}$$

$$k = \max \left\{ 1, \text{int} \left( \frac{L_B}{\Delta} \right) \right\}$$

essendo  $\text{int}$  la funzione intero più prossimo.

Con la posizione testé fatta, l'equazione matriciale espressa in forma compatta diventa dunque:

$$\dot{x} = Ax + Bz_{ps}$$

Il filtraggio del profilo non dovrebbe essere effettuato se già sono applicati dei filtri di media mobile o di anti-aliasing che attenuano le lunghezze d'onda minori di  $2 f_t$  (610mm) e se l'intervallo di campionamento  $\Delta$  è maggiore di 6.6 in. (168mm) [2].

---

### 2.4.3 CALCOLO DELL'IRI

Noti i valori, istante per istante, delle velocità di spostamento  $\dot{z}_s$  e  $\dot{z}_u$ , ottenuti integrando al passo il sistema di equazioni che descrive il moto del modello Quarter car, il calcolo dell'IRI viene effettuato mediante la formula, [19]:

$$IRI = \frac{1}{L} \cdot \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| \cdot dt$$

in cui è L la lunghezza del profilo e V la velocità standard di 80km/h.

Generalmente l'IRI si misura in mm/km oppure in in/mi. Tale indice, per come è stato definito, risulta essere mediabile rispetto a due profili, nel senso che se un profilo di 500m presenta un indice IRI di 100mm/km e il successivo profilo di 500m presenta un indice IRI di 200mm/km, l'intero profilo di 1000m presenterà un indice IRI di 150mm/km, e questa risulta essere una delle caratteristiche più importanti di tale indice, [2].

Come si è brevemente accennato in precedenza, l'indice IRI è stato definito per classificare le pavimentazioni stradali in riguardo al comfort di marcia nel veicolo e al danno arrecato alla pavimentazione. Ed è infatti notevole la correlazione fra l'IRI e il comfort o il danno, [17].

### 2.5 RIDE NUMBER (RN)

Allo scopo di effettuare una previsione del giudizio degli utenti riguardo al comfort di marcia fornito da una strada, è stata messa a punto una elaborazione analitica del profilo della pavimentazione univoca e stabile nel tempo e nello spazio: dato un certo profilo l'indice che si ricava dall'elaborazione è determinato diversamente dal giudizio di un campione di popolazione, che può cambiare se cambia il campione o, anche per lo stesso campione, se viene effettuato in condizioni diverse, [2].

L'indice di cui si parla è stato chiamato Ride Number (RN), ed il procedimento analitico per la sua determinazione è simile a quello per il calcolo dell'IRI.

Si parte, generalmente, dai due profili dei percorsi delle ruote del veicolo: l'elaborazione viene effettuata su ognuno di essi e i risultati sono combinati poi

---

nell'ultimo passo. Il RN può essere anche calcolato da un singolo profilo, se è il solo disponibile, [2].

Il profilo rilevato è anzitutto filtrato con una media mobile di 250 mm, a meno che non siano stati già applicati altri filtri di media mobile o di anti-aliasing che attenuano le onde di lunghezza minore di 2 ft (610 mm), oppure nel caso che l'intervallo di campionamento  $\Delta$  sia maggiore di 6.6 in (168 mm). Il profilo così ottenuto viene ancora filtrato con un filtro passa banda, costituito dal quarto di veicolo (come illustrato nel paragrafo precedente) caratterizzato dai seguenti parametri, [5]:

$$c=17 \text{ s-1}, \quad k_1=5120 \text{ s-2}, \quad k_2=390 \text{ s-2}, \quad \mu = 0.036$$

Del profilo che scaturisce da quest'ultima analisi viene calcolata la radice quadratica media rms, ottenendo un parametro adimensionale chiamato profile index (PI).

Dal PI si ricava il Ride Number attraverso la relazione, [2]:

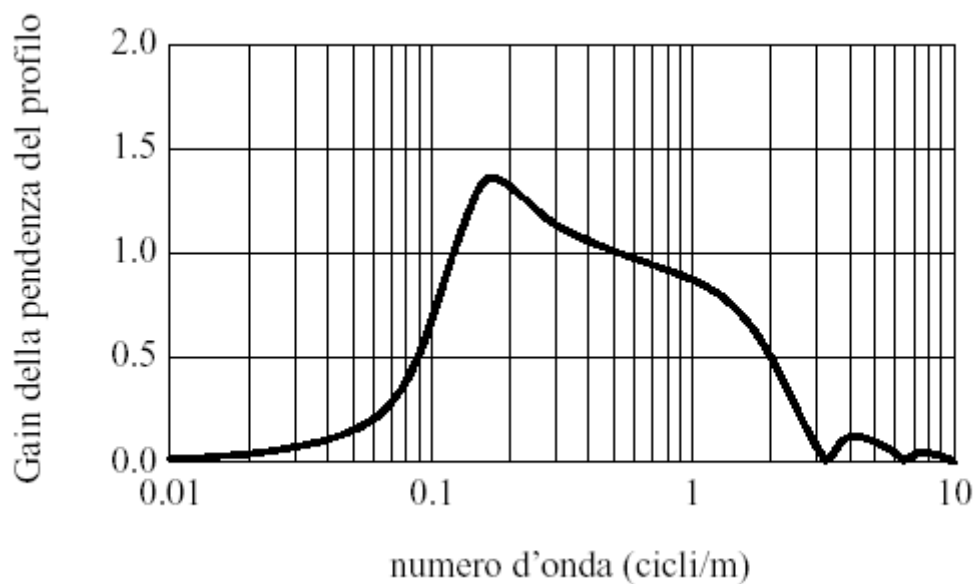
$$RN = 5 e^{-160 PI}$$

Se si ha un singolo profilo, il RN si ottiene direttamente dalla (2.5). Se sono disponibili i due profili dei percorsi delle ruote del veicolo, si calcolano i PI dei due profili, PI1 e PI2, e si effettua una particolare media per ottenere il PI complessivo, [2]:

$$PI = \sqrt{\frac{PI_1^2 + PI_2^2}{2}}$$

da qui attraverso la trasformazione esposta prima si ottiene il RN.

La risposta in frequenza del PI è mostrata di seguito, [5]:



**Fig. 2.29** – Risposta in frequenza del quarto di veicolo per il calcolo del PI

Si può notare che, la risposta del PI presenta una banda di sensibilità spostata su frequenze più grandi rispetto alla risposta del quarto di veicolo utilizzato per il calcolo dell'IRI. Il RN, come detto all'inizio del paragrafo, è una stima di un giudizio della popolazione. Tale giudizio, raccolto in uno studio condotto dalla AASHO, è espresso attraverso l'indice PSR (present serviceability rating) che varia da 0 a 5: al valore 0 corrisponde una strada in cattive condizioni; al valore 5 corrisponde una strada in ottime condizioni. La stima del PSR, effettuata attraverso una analisi statistica dei dati sulla pavimentazione, fornita dalla stessa AASHO, è chiamata PSI (present serviceability index).

Tra IRI e PSI sussiste la seguente relazione, [18]:

$$PSI \approx 5.0 - IRI / 100$$

---

## 2.6 ALTRI PARAMETRI SINTETICI DELLA REGOLARITA' SUPERFICIALE

Come accennato nel capitolo precedente sui profilometri, alcuni sistemi utilizzati per la valutazione della regolarità della pavimentazione operano rilevando le oscillazioni di un veicolo che viaggia sulla pavimentazione. Tali sistemi sono genericamente chiamati sistemi di misura della irregolarità stradale mediante la risposta di un veicolo tipo, traduzione della dizione *response-type road roughness measurement systems* (RTRRMS), [2].

Nello specifico, tali sistemi sono dei trasduttori che accumulano i movimenti delle sospensioni. Quasi tutti i sistemi seguono il concetto del misuratore messo a punto dal Bureau of Public Roads (BPR). Esso, è costituito da un rimorchio con una ruota singola e con un meccanismo che accumula le deflessioni della sospensione in una sola direzione (verso l'alto o verso il basso).

A causa della lenta risposta del sistema elettromeccanico di conteggio, le misurazioni con tale dispositivo vanno generalmente effettuate alla velocità di 32km/h.

La misura della irregolarità che si ottiene corrisponde ai pollici di movimento della sospensione in una sola direzione, normalizzata rispetto alla distanza percorsa. Sebbene non ovvio, questa misura della risposta del veicolo è molto simile, nel suo contenuto in frequenza, all'accelerazione del corpo del veicolo, così che essa è fortemente correlata alle vibrazioni indotte all'abitacolo del veicolo stesso, [2].

Il sistema utilizzato dalla Autostrade S.p.A. per la valutazione della regolarità della superficie stradale, denominato Automatic Road Analyser (ARAN), è costituito da un furgone IVECO Daily 30.8 sul quale sono montate diverse attrezzature per la misura della regolarità della pavimentazione, delle pendenze longitudinali e trasversali, dei raggi di curvatura, del profilo trasversale (eventuali ormaie).

Per quanto concerne la misura della regolarità mediante l'ARAN, viene rilevata una accelerazione verticale che, dopo elaborazione, si presenta sotto forma di accelerazione efficace  $a_{eff}$ , cioè la radice quadrata del valore medio di  $a^2$  :

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{x_f - x_i} \cdot \int_{x_i}^{x_f} a^2 \cdot dx}$$

dove  $x$  rappresenta la generica ascissa della sezione stradale.

---

Attraverso una correlazione statistica, la *aeff* viene trasformata in un numero che va da 0 a 10, che rappresenta il Riding Comfort Index (RCI), e che esprime un giudizio sulla qualità della strada.

Altri due sistemi di misurazione della irregolarità comunemente usati sono il Portland Cement Association (PCA) Meter e il Mays Ride Meter. Essi misurano i movimenti verticali dell'asse posteriore (asse non motore) di un'automobile relativi al corpo del veicolo.

Il limite di questi dispositivi di misura che appartengono alla famiglia dei sistemi di tipo a risposta (*response-type*), è rappresentata principalmente dalla forte dipendenza della misura dalle caratteristiche meccaniche ed inerziali del veicolo. Tali caratteristiche anche se sono definite in modo standard sono soggette ad uno scostamento da veicolo a veicolo inoltre, cosa ben più importante, possono essere soggette a sensibili variazioni nel tempo che contribuiscono a diminuire notevolmente l'affidabilità statistica della misura ed, in generale, è stato riscontrato che i parametri calcolati sono difficilmente correlabili con quelli maggiormente in uso (RN, IRI) nella gestione della manutenzione stradale, [2].

## **2.7 METODI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLE SEZIONI OMOGENEE**

Le metodologie da utilizzare nell'analisi dipendono essenzialmente dal tipo di attributo preso in esame. Come si è potuto osservare nella distinzione tra dati di inventario e dati di stato, gli attributi possono essere di tipo qualitativo o di tipo numerico. Gli attributi misurati attraverso variabili numeriche possono a loro volta suddividersi in discontinui come per esempio il volume di traffico, che varia in corrispondenza dei nodi o di strutture industriali, e quasi continui tipo la profondità delle ormaie o l'aderenza.

Per i dati di tipo qualitativo non esiste un vero problema di individuazione delle sezioni omogenee, perché l'attributo è già registrato in classi di appartenenza, per esempio relativamente al tipo di pavimentazione si può avere la classificazione in flessibile, semirigida o rigida.

Anche per i parametri misurati attraverso variabili numeriche di tipo discontinuo il problema risulta semplificato, infatti si può procedere ad una aggregazione in classi, considerando omogenee le sezioni che hanno valori compresi in intervalli prestabiliti, come si usa per il volume di traffico commerciale [veic/gg]:

---

classe - 1:  $TGMp \leq 1000$

classe - 2:  $1000 < TGMp < 2000$ , etc.

Gli attributi di tipo numerico rilevati in continuo vengono solitamente paragonati ad una distribuzione di variabili aleatorie, la cui dispersione attorno al valore medio è da attribuire ad errori di misura o a disomogeneità proprie della superficie.

Per questo tipo di dati possono essere applicati diversi criteri per la determinazione delle sezioni omogenee, [21] [26]:

- sezionamento per appartenenza a classi, analogo a quello descritto per gli attributi numerici discontinui;
- sezionamento per differenza tra valori successivi: viene fissata una variazione massima ammissibile, ogni valore viene confrontato con quello iniziale della sezione corrente e la nuova sezione è creata ogni volta che la differenza è maggiore della variazione ammissibile.
- sezionamento con criteri statistici: è basato sull'assunzione che le misure di un qualsiasi attributo, se effettuate lungo un tronco stradale con frequenza spaziale costante, presentano una struttura tipica delle serie temporali, e come tali potrebbero essere analizzate ricercando le tratte in cui la serie si presenta stazionaria. In questi tratti le misure effettuate si presentano identicamente distribuite e possono essere quindi rappresentate una volta noti i parametri della legge densità di probabilità.

Per serie storica o serie temporale si intende una successione di osservazioni ordinate logicamente secondo una variabile  $t$ , solitamente designata come tempo; nel caso delle misure di ambito stradale invece la variabile  $t$  è lo spazio, in particolare è la progressiva chilometrica a cui vengono rilevati i dati. Le serie temporali con valori medi invarianti rispetto alla variabile  $t$  vengono detti stazionarie. La stazionarietà in senso debole si realizza quando valgono le seguenti condizioni:

1. il valore medio del processo  $X_t$  è costante e pari a  $\mu$  al variare di  $t$ :  
 $E(X_t) = \mu$ , per ogni  $t$
2. il processo ha varianza  $\sigma^2$  finita e costante al variare di  $t$ :  
 $E(X_t - \mu)^2 = \sigma^2 < +\infty$ , per ogni  $t$
3. per ogni  $t$  ed  $s$  esiste una funzione di  $|t-s|$ , detta auto covarianza o funzione di auto covarianza e indicata con  $\gamma$ , che misura la covarianza fra le v.a.  $X_t$  e  $X_s$ :  
 $E(X_t - \mu)(X_s - \mu) = \gamma(|t-s|)$ , per ogni coppia  $(t,s)$ .



---

Sicuramente soltanto l'ultimo dei criteri elencati, quello di tipo statistico, fornisce il necessario rigore di sezionamento richiesto dagli attributi numerici di tipo continuo.

Tale approccio all'analisi dei dati si presenta non sempre perseguibile o agevole a causa di due ordini di problemi: le misure non sempre sono eseguite con distanziamento costante e possono presentare, oltre alla variabilità casuale, anche delle variabilità di tipo sistematico. Per far fronte ad entrambe le problematiche si sono per tanto diffusi metodi di carattere grafico statistico.

Tutti i criteri di tipo statistico, anche quelli di carattere grafico statistico, sono caratterizzati dalla ricerca dei *break points* all'interno della serie di dati; per *break point* si intende un punto che individua una transizione, un cambiamento nell'andamento dei dati, non necessariamente visibile, ma tale che il modello statistico rappresentante la serie di misure sia diverso, tale diversità può essere associata alla variazione di un parametro, come ad esempio il valore medio o la varianza.

Le transizioni individuate da questo tipo di analisi sono quelle derivanti da fasi di costruzione e/o manutenzione diversificate nel tempo, da un'usura non uniforme causata dalla differente intensità di traffico, da un deterioramento parziale della pavimentazione.

I metodi fondati su criteri statistici possono essere classificati in [22], [26]:

1. *lineari*, quando analizzano la serie di misure in modo sequenziale o dicotomico, individuando progressivamente le sezioni omogenee lungo il tronco stradale; il vantaggio di questa tipologia è la facile implementazione, ma non fornisce la partizione ottimale.
2. *non lineari*, quando l'insieme dei dati appartenenti al tronco è analizzato complessivamente giungendo alla individuazione simultanea della partizione ottimale dello stesso sotto il profilo della omogeneità o stazionarietà dei dati all'interno di ciascuna sezione. Il problema viene risolto attraverso metodi sviluppati in econometria per l'individuazione dei punti di discontinuità all'interno delle serie temporali.

Nei paragrafi successivi verranno illustrati i metodi grafico-statistici e i metodi basati sull'analogia con le serie temporali.

### **2.7.1 METODI GRAFICO-STATISTICI: CDA E CUMSUM**

I due metodi sono analoghi, entrambi derivano da una procedura già in uso negli anni '50 nell'ambito del controllo della qualità dei processi industriali.

Sia il CUMSUM adottato dalla HTC, sia il CDA adottato dall'AASHTO sono molto pratici perché hanno un immediato riscontro grafico.

Il metodo delle differenze cumulate è stato proposto dall'AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) per individuare le sezioni omogenee di una serie di misure relative alle caratteristiche superficiali di una pavimentazione stradale.

Dai dati rilevati con le opportune apparecchiature si ottiene la funzione  $r(x)$  che descrive il valore assunto dal parametro in esame in corrispondenza della progressiva  $x$ .

Le apparecchiature rilevano le misure ad intervalli distanziati di  $x_i$  metri, per ogni intervallo  $i$ -esimo si definisce  $a_i$ , l'area sottesa dalla funzione  $r(x)$  nell'intervallo  $i$ -esimo come:

$$a_i = \frac{r_{i-1} + r_i}{2} x_i$$

essendo poi:

$N$  il numero totale delle misure,

$L_{tot}$  la lunghezza totale del tratto esaminato, si definisce la quantità

$$F = \frac{\sum_1^N a_i}{L_{tot}} = \frac{A_{tot}}{L_{tot}}$$

Allora la funzione differenza cumulata alla progressiva  $x$  sarà

$$Z_x = \sum_1^n a_i - F \sum_1^n x_i$$

quando le misure sono state rilevate a passo costante, ossia quando gli  $x_i$  sono gli stessi per ogni  $i$ , allora la funzione  $Z_x$  assume la seguente forma

$$Z_x = \sum_1^n a_i - \frac{n}{N} \sum_1^N a_i$$

perché  $\sum_1^n x_i$  è uguale a  $\bar{x}n = \frac{L_p}{N}n$ .

---

Andando a rappresentare in un grafico la funzione differenza cumulata  $Z_x$  in relazione alla progressiva  $x = \sum_1^n x_i$  si ottiene solitamente un diagramma approssimabile da tratti rettilinei con diverse pendenze, i punti di transizione che determinano le sezioni omogenee saranno allora individuati in corrispondenza dei cambiamenti di pendenza di questi tratti .

I cambi di pendenza significativi del diagramma di  $Z_x$  vengono quindi interpretati come inizio di una sezione con attributi significativamente diversi da quella precedente.

Per ottenere una segmentazione efficace, da sfruttare nella decisione degli interventi di manutenzione da applicare, bisogna introdurre due vincoli:

1. la lunghezza minima della sezione omogenea,  $L_{\min}$
2. la differenza minima tra i valori medi di segmenti adiacenti,  $\Delta_{\min}$  .

Il motivo della imposizione di una lunghezza minima deriva dalla natura stessa dei parametri esaminati: si ritiene che le misure non possano variare sensibilmente in un intervallo di ridotta lunghezza, perché rimangono comunque caratteristiche proprie di una medesima superficie.

Al diminuire del valore scelto per  $L_{\min}$  la segmentazione si adatta meglio alla serie di misure in analisi, ma può risultare poco significativa per le successive applicazioni, come gli interventi di manutenzione; i valori adottati per  $L_{\min}$  variano in generale tra i 100 e i 300 m.

La scelta del valore  $\Delta_{\min}$  dipende dal dato in esame, deve essere effettuata in riferimento alle variazioni del parametro in studio che possono condizionare la selezione dei diversi interventi manutentivi.

La suddivisione è coadiuvata da un controllo statistico dei dati, tramite l'applicazione del test t-student, in modo da verificare che le differenze dei valori medi di sezioni omogenee adiacenti siano statisticamente significative (la descrizione di questo test verrà affrontata nel prossimo paragrafo).

Il metodo CUMSUM ( CUMulative SUM ) è stato impiegato dalla HTC Infrastructure Management per analizzare dati relativi alle infrastrutture della Nuova Zelanda.

La procedura di calcolo è ancora più semplificata rispetto a quella del CDA, perché suppone misure rilevate a passo costante:

1. Si calcola un valore “target”  $X_t$  della serie dei dati, ossia la media.

---

Nel caso dei parametri di stato di una strada questo valore target è la media di tutte le misure.

2. Si calcola il valore  $CUMSUM_i$  relativo ad ogni misura.

$$CUMSUM_i = X_i - X_t + CUMSUM_{i-1}$$

Graficando i valori  $CUMSUM$  per ogni misura si ottiene un andamento analogo a quello ottenuto con il CDA, in sostanza i due grafici si differenziano solo per un fattore di scala.

Anche qui quindi si identificano i break points in corrispondenza dei cambi di pendenza con gli stessi criteri illustrati per il CDA.

Come si vedrà nel terzo capitolo, nell'applicazione a dati reali l'andamento della differenza cumulata  $Z_x$ , o analogamente dei valori  $CUMSUM$ , può presentare un andamento poco regolare e difficile da interpretare, è necessario quindi l'utilizzo di alcuni criteri che permettono di affinare il sezionamento individuando soltanto i punti di transizione più veritieri.

## **2.7.2 METODI LINEARI**

### **2.7.2.1 AGGREGAZIONE DI TRATTE ELEMENTARI**

Tale metodo, partendo dalla definizione di stazionarietà in senso debole, aggrega sequenzialmente le tratte "elementari", intendendo per "elementari" le tratte per le quali non possa essere rifiutata l'ipotesi di costanza della media e della varianza campionaria, stimata in base alle misure effettuate. In sostanza l'applicazione di tale metodo, partendo dall'osservazione che le misure sperimentali possano essere considerate variabili aleatorie, presuppone la formulazione di un'ipotesi circa la distribuzione dei dati rilevati all'interno delle sezioni omogenee che si andranno a individuare, e la definizione di un numero minimo di misure  $k$  che vanno comunque aggregate, per costruire le tratte elementari sulle quali eseguire l'analisi comparativa [21], [22].

Questo numero  $k$  non può essere univocamente determinato, dipende infatti dal passo a cui sono state rilevate le misure; tale vincolo traduce la necessità di credere che le

misure relative ad una specifica caratteristica non possano variare sensibilmente in un intervallo troppo ristretto, ossia minore di k misure.

Nel caso di attributi di tipo quantitativo, sembra lecito supporre che le misure siano distribuite secondo una legge di probabilità di tipo normale (legge degli errori), per tanto il metodo verrà illustrato con riferimento a tale ipotesi.

L'articolazione del metodo può essere sintetizzato nei punti di seguito illustrati:

- 1) si sceglie la numerosità minima del campione da analizzare k;
- 2) si ipotizza una legge di probabilità secondo la quale risultano distribuite le misure all'interno di una sezione omogenea (legge di probabilità normale);
- 3) si suddivide l'intera tratta su cui sono state eseguite le misure in n tratte ( $n = \text{int}(N/k)$ ) elementari contenenti ciascuna  $k_i$  misure ( $k_i = k$  per  $i = 1, \dots, (n-1)$  mentre  $k_n = N - (n-1) * k$ );
- 4) si valutano la media e la varianza campionaria delle misure effettuate su due elementi in successione, a partire dai primi due elementi, in base alle seguenti definizioni:

- media campionaria sull'i-esimo elemento:  $\bar{X}_i = \sum_{j=1}^{k_i} x_{ij} / k_i$

- varianza campionaria sull'i-esimo elemento:  $S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^{k_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{k_i - 1}$

- 5) si effettuano i test delle ipotesi relativi all'eguaglianza della media e della varianza delle popolazioni da cui sono state estratte le misure campionarie relative ai due elementi in esame, scegliendo un prefissato valore per la probabilità di falso rifiuto  $\alpha$  (tipicamente  $\alpha = 0.05$  o  $0.01$ ), con l'ausilio rispettivamente dei seguenti test:

→ test-t di Student (test sulla differenza fra due medie di v.a. normali)

ipotesi "a"  $I_a: \mu_i = \mu_{i+1}$

$$|X_t| = \left| \frac{\bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i}{\sqrt{\frac{k_i S_i^2 + k_{i+1} S_{i+1}^2}{k_i + k_{i+1} - 2} \left( \frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_{i+1}} \right)}} \right| < t_{\alpha/2}$$

dove  $t_{\alpha/2}$  è il valore della variabile aleatoria T di Student con  $v=k_i+k_{i+1}-2$  gradi di libertà che ha  $\alpha/2$  probabilità di essere superato.

→ problema di Behrens-Fisher (test sul rapporto tra due varianze di v.a. normali)

ipotesi “b”  $I_b : \sigma_i^2 = \sigma_{i+1}^2$

$$\frac{1}{F_{\alpha/2}} < X_F = \frac{\frac{k_i S_i^2}{k_i - 1}}{\frac{k_{i+1} S_{i+1}^2}{k_{i+1} - 1}} < F_{\alpha/2}$$

dove  $F_{\alpha/2}$  è il valore della variabile aleatoria F di Fisher con  $v_l=k_i-1$  e  $v_u=k_{i+1}-2$  gradi di libertà che ha  $\alpha/2$  probabilità di essere superato.

6a) se è possibile rigettare almeno una delle ipotesi  $I_a$  o  $I_b$ , con una probabilità di  $\alpha$  di falso rifiuto, l'elemento i-esimo va a costituire una sezione omogenea e si applica nuovamente il punto 4 alle successive tratte (i+1)-esima e (i+2)-esima;

6b) se non è possibile rigettare entrambe le ipotesi  $I_a$  o  $I_b$ , le due tratte elementari sono aggregate e vanno a costituire un unico tratto elementare ; si provvede quindi a rinumerare le tratte elementari ( $n = n-1$ ), proseguendo il confronto tra le tratte in sequenza a partire dalla tratta elementare i-esima, secondo la procedura illustrata ai punti 4) e 5);

7) si procede fino ad esaurimento dei tratti elementari, ossia fino a quando l'n-esima tratta elementare non viene posta a confronto con la (n-1)-esima.

Una volta individuate le sezioni per le quali non è possibile rigettare le ipotesi di stazionarietà in media e in varianza, si deve verificare l'ipotesi relativa alla distribuzione di densità di probabilità e quella relativa all'indipendenza dei dati su tali sezioni omogenee.

Con riferimento alla verifica della scelta della legge densità di probabilità (in questo caso la distribuzione normale), si dividono le  $n_i$  misure appartenenti alla sezione omogenea i-esima (  $n_i = k, 2*k, 3*k, \dots, N$  ) in j classi, essendo  $n_{ij} (\sum_j n_{ij} = n_i)$  le osservazioni che cadono nella classe j-esima (per esempio è il numero di misure del

parametro  $x$  che ricadono nell'intervallo  $[a, b]$ ). Si vuole verificare, sulla scorta degli  $n_i$  valori misurati l'ipotesi nulla:

$$I_d : \pi_j = p_j$$

dove  $p_j = \frac{n_{ij}}{n_i}$  è la probabilità, calcolata attraverso la legge di probabilità ipotizzata, che

un'osservazione cada nella classe  $j$ -esima.

Si dimostra che l'ipotesi  $I_d$  non può essere rifiutata, con una probabilità di errore  $\alpha$ , se:

$$X_{\chi^2} = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \leq \chi_{\alpha^2}$$

Dove  $\chi_{\alpha}^2$  è il valore della variabile aleatoria chi-quadro, con  $v = j-h-1$  gradi di libertà, che ha  $\alpha$  probabilità di essere superato (tipicamente  $\alpha=0.05 \div 0.01$ ),  $j$  e  $h$  sono rispettivamente il numero delle classi e il numero dei parametri della distribuzione teorica (p.e. per la distribuzione normale  $h=2$ ).

L'ipotesi relativa all'indipendenza dei dati (mancanza di correlazione tra i dati della serie) può essere accertata attraverso il test proposto da Cox e Lewis, che adopera come statistica il coefficiente di autocorrelazione campionario di lag 1, ovvero:

$$r_{lag=1} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (x_{i,j} - \bar{x}_i)(x_{i,j+1} - \bar{X}_i)}{\sum_{j=1}^{n_i} (x_{i,j} - \bar{X}_i)^2} > N_{\alpha}(1, \frac{1}{n_i})$$

Infatti nell'ipotesi nulla di indipendenza dei valori misurati  $(x_{i1}, \dots, x_{in_i})$  la statistica  $r_{lag=1}$  è asintoticamente distribuita in modo normale con media nulla e varianza pari a  $1/n$ , [21] [22].

---

### 2.7.2.2 METODO DICOTOMICO

Il metodo che si andrà a descrivere nel seguito è stato proposto dal LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) [20].

La procedura descritta consiste nello scomporre la serie di dati misurati in un certo numero di sezioni omogenee, all'interno delle quali ha senso parlare di media e varianza della grandezza misurata, ma che allo stesso tempo presentano tra di loro scarti tra i valori medi significativi.

Ciò viene effettuato con l'ausilio di:

- un criterio per verificare l'omogeneità dei dati all'interno di una sezione;
- un metodo di suddivisione in grado di individuare il punto in cui si verificano variazioni significative nella sequenza dei dati.

#### *Il criterio per la verifica dell'omogeneità*

Nell'ipotesi che le misure appartengano ad una popolazione distribuita con legge Normale, si può verificare l'omogeneità di una sezione attraverso un test basato sulla media dei quadrati delle differenze successive. Se le misure  $n$  sono più di 25 la quantità:

$$u = (1-r) \sqrt{\frac{n^2-1}{n-2}} \quad \text{dove} \quad r = \frac{1}{2} \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (x_{j+1} - x_j)^2}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}$$

è distribuita come una variabile aleatoria Normale standard.

Detta pertanto  $u_\alpha$  il valore del percentile  $\alpha$  della variabile aleatoria Normale standard si ha che:

1. se  $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$   
la sezione è omogenea,
2. se  $u > u_{1-\alpha}$   
vi sono delle variazioni sistematiche lente o dei raggruppamenti anomali,
3. se  $u < u_\alpha$   
vi sono delle fluttuazioni rapide nei dati, indicanti generalmente degli errori di misura.



Nelle relazioni precedentemente scritte  $\alpha$  rappresenta la probabilità di affermare a torto che l'indicatore  $u$  non appartiene ad una popolazione distribuita come una variabile aleatoria Normale Standard (probabilità di falso rifiuto) [20].

#### *Il criterio per suddividere le sezioni non omogenee*

Nel caso in cui la sezione non sia omogenea, ossia se non risulta  $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$ , si pone il problema di individuare il punto di frontiera, il break point, tra le due zone omogenee in essa eventualmente presente; ciò viene perseguito con l'ausilio di un metodo dicotomico che utilizza le proprietà di composizione della varianza.

Se  $n$  è il numero totale delle misure effettuate e  $\bar{x}$  il valore medio definito  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j$

S la somma dei quadrati degli scarti dal valore medio  $S = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2$

allora  $S$  può essere decomposto in una somma di quattro termini in funzione delle medie dei valori misurati nelle due zone:

1° zona: composta da  $i$  punti di misura con  $1 \leq j \leq i$ , in cui la media dei valori è  $\bar{x}_1$

2° zona: composta da  $(n-i)$  punti di misura con  $i+1 \leq j \leq n$ , in cui la media dei valori è  $\bar{x}_2$

essendo  $\bar{x}_1 = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i x_j$  e  $\bar{x}_2 = \frac{1}{(n-i)} \sum_{j=i+1}^n x_j$

Pertanto risulta  $S = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2 + i(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (n-i)(\bar{x}_2 - \bar{x})^2$

ponendo  $W = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2$  e  $B = i(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (n-i)(\bar{x}_2 - \bar{x})^2$

si ha  $S = B + W$ ; dove

$W$  rappresenta la somma dei quadrati degli scarti all'interno delle zone omogenee e  $B$  rappresenta la somma dei quadrati degli scarti tra le zone omogenee.

La grandezza  $S$  è costante per una fissata serie di misure, mentre le grandezze  $W$  e  $B$  variano con  $j$ , che definisce la posizione del break point tra le due zone omogenee in

cui può essere suddivisa la sezione iniziale che non ha soddisfatto il precedente criterio di omogeneità.

Si può osservare che il valore di  $j$  che individua la frontiera è quello che massimizza il rapporto  $B/W$ .

Osservando che i termini  $\sum_{k=1}^p (x_k - \bar{x})^2$  possono essere espressi nella forma di seguito riportata [20]:

$$\sum_{k=1}^p (x_k - \bar{x})^2 = \sum_{k=1}^p x_k^2 - 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum_{k=1}^p x_k + p \cdot \bar{x}^2 = \sum_{k=1}^p x_k^2 - p \cdot \bar{x}^2 = \sum_{k=1}^p x_k^2 - \frac{1}{p} \left( \sum_{k=1}^p x_k \right)^2$$

Si ha:

$$\begin{aligned} W &= \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2 = \sum_{j=1}^i x_j^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 + \sum_{j=1}^i x_j^2 - \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2 = \\ &= \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 - \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= S - W = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 - \sum_{j=1}^n x_j^2 + \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 + \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2 = \\ &= \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 - \sum_{j=1}^n x_j^2 + \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 + \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2 = \\ &= -\frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 + \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 + \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2 \end{aligned}$$

Effettuando un cambiamento di origine le variabili iniziali  $x_j$  si trasformano nelle variabili

$y_j = x_j - \bar{x}$ , e si ha:

$$\sum_{j=1}^n y_j = 0 \text{ da cui } \sum_{j=1}^i y_j = - \sum_{j=i+1}^n y_j \quad \text{e} \quad \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 = \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2$$

Le espressioni di  $B$  e di  $W$  possono essere espresse in funzione della nuova variabile  $y_j$ , [20]:

$$\begin{aligned}
W &= \sum_{j=1}^n (y_j + \bar{x})^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i (y_j + \bar{x}) \right)^2 - \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n (y_j + \bar{x}) \right)^2 = \\
&= \sum_{j=1}^n y_j^2 + 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^n y_j + n \cdot \bar{x}^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i y_j + i \cdot \bar{x} \right)^2 - \frac{1}{n-i} \left( \sum_{j=i+1}^n y_j + (n-i) \cdot \bar{x} \right)^2 = \\
&= \sum_{j=1}^n y_j^2 + 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^n y_j + n \cdot \bar{x}^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 - 2 \cdot \frac{i}{i} \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^i y_j - \frac{i^2}{i} \bar{x}^2 - \frac{1}{n-i} \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2 - 2 \cdot \frac{(n-i)}{(n-i)} \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=i+1}^n y_j - \frac{(n-i)^2}{(n-i)} \bar{x}^2 = \\
&= \sum_{j=1}^n y_j^2 + (n-i-n+i) \cdot \bar{x}^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 - 2 \cdot \bar{x} \cdot \left( \sum_{j=1}^i y_j + \sum_{j=i+1}^n y_j \right) - \frac{1}{n-i} \left( - \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 = \\
&= \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{(n-i+i)}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 - 2 \cdot \bar{x} \cdot \left( \sum_{j=1}^n y_j \right) = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 \\
\\
B &= -\frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n (y_j + \bar{x}) \right)^2 + \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i (y_j + \bar{x}) \right)^2 + \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n (y_j + \bar{x}) \right)^2 = \\
&= -\frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n y_j \right)^2 - \frac{n^2}{n} \bar{x}^2 - \frac{2 \cdot n}{n} \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^n y_j + \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 + \frac{i^2}{i} \bar{x}^2 + \frac{2 \cdot i}{i} \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^i y_j + \frac{1}{n-i} \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2 + \frac{(n-i)^2}{n-i} \bar{x}^2 + \frac{2(n-i)}{n-i} \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=i+1}^n y_j = \\
&= (-n+i+n-i) \bar{x}^2 + \left( \frac{1}{i} + \frac{1}{n-i} \right) \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 + 2 \cdot \bar{x} \cdot \left( \sum_{j=1}^i y_j + \sum_{j=i+1}^n y_j \right) = \\
&= \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 + 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^n y_j = \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2
\end{aligned}$$

Per una fissata serie di dati misurati si può porre:

$$\sum_{j=1}^n y_j^2 = cte \text{ e } g(i) = \frac{n}{i(n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2$$

Da cui si ha:  $W = cte - g(i)$  e  $B = g(i)$

Il rapporto  $B/W$  assume il valore massimo in corrispondenza del massimo della funzione  $g(i)$ , pertanto la frontiera tra le due zone omogenee corrisponde alla progressiva del punto di misura  $i$ -esimo per il quale  $g(i)$  è massima.

#### *L'algoritmo generale per la suddivisione in sezioni omogenee*

I criteri appena descritti possono essere combinati in un algoritmo iterativo che consente l'individuazione delle sezioni omogenee all'interno delle misure rilevate su un tronco stradale. L'algoritmo si sviluppa secondo le fasi di seguito illustrate [20]:

- 1) si effettua il test di omogeneità sulla tratta su cui sono state effettuate le  $N$  misure, se è verificato essa costituisce un'unica sezione omogenea e si associano ad essa gli

indicatori caratteristici (valore medio e varianza della grandezza misurata), in caso contrario si passa alla fase successiva;

2) se sono state individuate variazioni lente, o gruppi di dati anomali ( $u > u_{1-\alpha}$ ), viene applicato il criterio di suddivisione, si calcolano gli N valori della funzione:

$$g(k) = \frac{N}{k(N-k)} \left( \sum_{j=1}^k y_j \right)^2 \quad 1 \leq k \leq N-1$$

dove  $y_j = x_j - \bar{X}$

$x_j$  è il valore dell'attributo misurato sperimentalmente in sito nel punto j-esimo,

$\bar{X}$  è il valore medio delle misure effettuate sull'intero tronco stradale.

La tratta in esame viene suddivisa in due tratte minori in base al break point individuato, che coincide con la progressiva della misura  $x_{k_{\max}}$  a cui corrisponde il massimo della funzione  $g(k)$ .

Indicando con  $k_{\max}$  la posizione del massimo di  $g(k)$ , la prima tratta ottenuta risulta essere costituita da  $k_{\max}$  misure, comprese tra la prima e  $x_{k_{\max}}$  (il break point individuato), la seconda è invece costituita da  $(n-k_{\max})$  misure, comprese tra  $(x_{k_{\max}} + 1)$  e l' n-esimo punto di misura;

3) si applica il test di omogeneità alle due tratte individuate nella fase precedente;

4a) le tratte che soddisfano il criterio di omogeneità costituiscono sezioni omogenee, quindi si può procedere ad assegnargli i valori caratteristici dell'attributo in esse misurato (valore medio e varianza campionaria);

4b) per le tratte che non soddisfano il criterio di omogeneità si applica nuovamente la procedura di suddivisione illustrata nella fase 2), in cui si pone  $N = k_{\max}$  per la prima tratta non omogenea e  $N = N - k_{\max} + 1$  per la seconda tratta non omogenea. Si applica quindi il test di omogeneità alle ulteriori tratte individuate;

5) si procede fino a quando per tutte le sezioni individuate dalla suddivisione, tramite la ricerca del valore massimo di  $g(k)$ , è soddisfatto il criterio di omogeneità, o al limite fino a che le sezioni individuate non contengono un numero di misure limite.

---

### 2.7.2.3 METODO BAYESIANO

Il metodo proposto da Fridtjof Thomas utilizza un approccio bayesiano nella procedura di inferenza statistica, utilizzata come strumento per individuare i punti di frontiera delle sezioni omogenee all'interno della serie di misure [24].

Prima di illustrare il metodo statistico adottato bisogna introdurre alcuni concetti base della statistica bayesiana.

Dato un evento  $E$  dipendente da una serie di cause e ipotesi  $H_i$ , ogni causa  $H_i$  può generare l'evento  $E$  secondo le probabilità  $P(E|H_i)$ ; le cause  $H_i$  d'altra parte possono verificarsi con probabilità  $P(H_i)$ . Il teorema di Bayes permette di conoscere la probabilità che l'evento  $E$  sia stato causato da  $H_i$ , la formulazione del teorema è la seguente:

$$P(H_i|E) = \frac{P(H_i) \cdot P(E|H_i)}{\sum_{j=1}^k P(H_j) \cdot P(E|H_j)} \quad \text{per } i = 1, 2, \dots, k$$

oppure

$$P(H_i|E) \propto P(E|H_i) \cdot P(H_i) \quad \text{dato che } P(E) = \sum_{j=1}^k P(H_j) \cdot P(E|H_j) = \text{cost per ogni } H_i$$

le  $P(H_i|E)$ ; vengono definite probabilità a posteriori dell'ipotesi  $H_i$  noto l'evento  $E$ . Esse sono funzioni delle *probabilità a priori*  $P(H_i)$  che hanno le singole ipotesi di verificarsi e delle *probabilità probative* (o verosimiglianze)  $P(E|H_i)$  che l'effetto sia causato da una fissata ipotesi  $H_i$ . Il significato del teorema di Bayes è che la probabilità a posteriori sull'ipotesi  $H_i$  si modifica rispetto alla probabilità a priori, sulla stessa ipotesi, grazie all'informazione  $P(E|H_i)$  relativa all'evento  $E$ . La struttura logica del teorema di Bayes è proprio quella tipica di una ricerca scientifica che da informazioni deducibili dall'esperienza (le probabilità probative) e da informazioni precedenti (probabilità a priori), prende decisioni a favore di una certa ipotesi, paragonando le probabilità a posteriori.

L'analisi bayesiana per la ricerca dei break points in una serie di dati  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  è basata sull'idea di confrontare la distribuzione marginale a posteriori  $P(M_r | x_1, x_2, \dots, x_n)$ , relativa all'ipotesi  $M_r$  (che suppone la presenza di un break), con  $P(M_0 | x_1, x_2, \dots, x_n)$ , relativa all'ipotesi  $M_0$  (che suppone la serie priva di break) [24].

---

Il metodo di sezionamento in questione è studiato per analizzare serie di dati relativi alle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni stradali, esso è basato su un modello statistico che

suppone le misure come variabili aleatorie dipendenti, non è assunta però nessuna ipotesi preliminare sui break points da individuare.

L'ipotesi di misure dipendenti, come si vedrà nell'applicazione a dati reali, è effettivamente corretta.

La procedura individua i break points non solo in corrispondenza di cambi di livello (valore medio) e varianza, ma anche in corrispondenza di una variazione dell'autocorrelazione.

Si ipotizza infatti che l'insieme di dati  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , rilevati a passo costante, sia ben rappresentabile da un modello autoregressivo del primo ordine AR(1), che può essere così formulato:

$$x_t = \alpha_1 + \beta_1 x_{t-1} + \varepsilon_t \quad \text{per } t = 1, 2, \dots, n$$

dove  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  sono parametri caratteristici del modello,  $\varepsilon_t$  è il termine di disturbo.

Si assume che i termini di disturbo siano indipendenti e seguano una distribuzione normale con media nulla e varianza  $\sigma_1^2$  [24].

Al fine di migliorare l'adattamento dei dati con il modello ipotizzato, l'autore suggerisce l'utilizzo delle trasformazioni di Box-Cox:

$$Z_t(\lambda) = \frac{Z_t^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{per } \lambda \neq 0$$

$$Z_t(\lambda) = \log Z_t \quad \text{per } \lambda = 0.$$

Per ogni tipo di serie di dati analizzati bisognerebbe ricercare la trasformazione più appropriata, ma in letteratura sono presenti alcune indicazioni, tra cui quella che suggerisce una trasformazione logaritmica per le misure dell'IRI (International Roughness Index) [21].

Le sezioni omogenee sono individuate come le zone in cui il processo AR(1) è stazionario; infatti supporre l'esistenza di un break point nella serie di misure vuol dire supporre che il processo AR(1) non sia unico, ma cambi.

In caso di un unico break nella posizione  $r$  si avrà

$$x_t = \alpha_1 + \beta_1 \cdot x_{t-1} + \varepsilon_t \text{ per } t = 2, 3, \dots, r \text{ e}$$

$$x_t = \alpha_2 + \beta_2 \cdot x_{t+1} + \varepsilon_t \text{ per } t = r+1, \dots, n-1.$$

Nel seguito si descriverà la procedura per individuare un unico break point nella serie di dati, nel caso di molteplici break viene applicata sequenzialmente.

Il concetto caratteristico di questo metodo è che l'inevitabile incertezza sull'esatta posizione di un break point possa essere tradotta in termini di probabilità.

La formulazione analitica del procedimento [21] è molto complessa, verrà quindi riassunta nei suoi due passi principali:

1. Si calcola la probabilità  $p(change)$  che esista almeno un break nella serie:

$$p(change) = \frac{(n-7)^{-1} \cdot \sum_r B_{r_0}}{\left[ (n-7)^{-1} \cdot \sum_r B_{r_0} \right] + 1} = \frac{\sum_r B_{r_0}}{(n-7) + \sum_r B_{r_0}};$$

dove  $B_{r_0}$  è il fattore bayesiano che rappresenta il rapporto tra le distribuzioni a posteriori di  $M_r$  e  $M_0$ ; esso fornisce un giudizio sulla bontà del modello  $M_r$  rispetto al modello  $M_0$  (vedi successiva tabella 1).

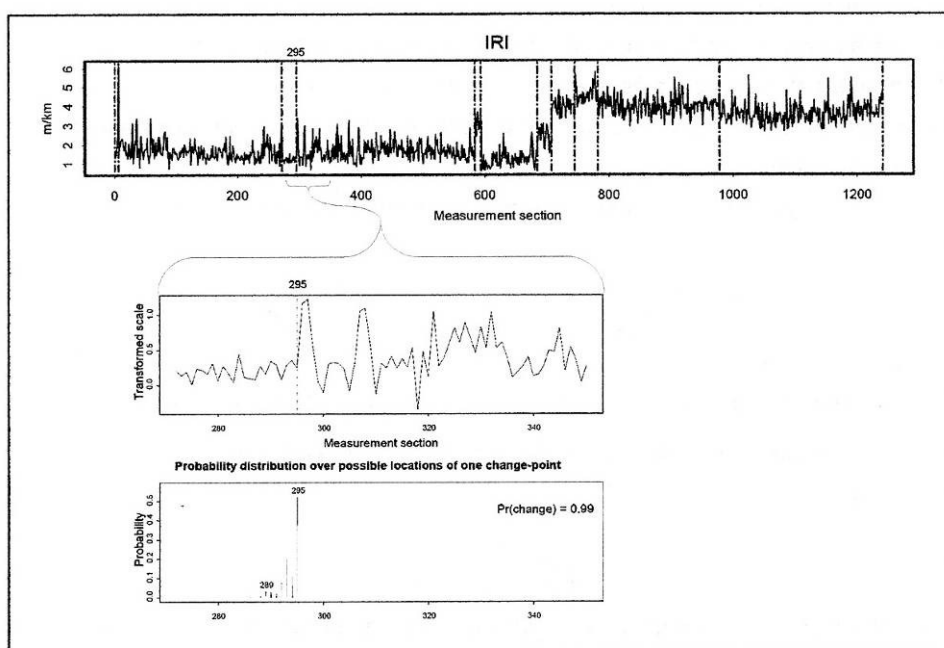
$$B_{r_0} = \frac{P(M_r | x_1, x_2, \dots, x_n)}{P(M_0 | x_1, x_2, \dots, x_n)}$$

2. In caso di un valore  $p(change)$  significativo, pari per esempio a 0,8, si passa ad individuare la locazione esatta del break point attraverso gli  $(n-7)$  valori delle probabilità a posteriori  $P(M_r | x_1, x_2, \dots, x_n)$ , che forniscono quindi una distribuzione di probabilità. Un ragionevole candidato per determinare l'esatta posizione del break, è il valore che corrisponde alla moda della distribuzione, dato che ad essa è associata la maggiore probabilità. La ragione per cui i valori sono  $(n-7)$  e non  $n$  deriva dalla espressione analitica della probabilità a posteriori per  $M_r$  [21].

$B_{r0}$	Veridicità di $M_r$
< 1	Negativa, i dati non supportano $M_r$
1-3	Non meritevole di nota
3-10	Sostanziale
10-30	Forte
30-99	Molto forte
>99	Affermativa

**Tabella 1** - Scala di giudizio per l'interpretazione del fattore bayesiano [5]

Il procedimento per la ricerca di molteplici break all'interno della stessa serie non è altro che l'applicazione sequenziale dei due passi descritti sopra; ogni break point è quindi il risultato del calcolo del valore  $p(\text{change})$  e della successiva analisi della distribuzione delle probabilità a posteriori. Un esempio grafico esplicativo è riportato in figura 2.30:



**Fig. 2.30** - Esempio di individuazione di un break point nel metodo bayesiano

Il punto di forza di questo approccio è la capacità di rilevare non solo un cambio del valore medio dei dati, ma anche della varianza e della autocorrelazione, ciò tuttavia può portare ad un elevato numero di sezioni individuate come omogenee.

Inoltre sebbene la procedura presenti un elevato rigore metodologico, non è possibile inserire vincoli del tipo lunghezza minima o differenza significativa tra i valori medi;



---

ciò può comportare un frazionamento eccessivo del tronco stradale, che rende necessario un successivo intervento da parte dell'ingegnere stradale.

### **2.7.3 METODO ECONOMETRICO NON LINEARE**

In questo paragrafo si vogliono illustrare i principi di un metodo, sviluppato nel campo dell'econometria, finalizzato alla ricerca dei break points all'interno di una serie temporale.

L'econometria è una branca della scienza economica che si avvale di applicazioni matematiche e metodi statistici al fine di analizzare i fenomeni economici e prevederne l'andamento nel tempo.

L'applicazione di un metodo econometrico alle misure stradali è innovativa, ma vista l'analogia precedentemente illustrata delle serie di misure rilevate a passo costante su un tronco stradale con le serie temporali, si ritiene che questo metodo possa essere adatto anche per rilevare i break points nelle serie di misure degli attributi caratteristici di una pavimentazione stradale.

Sia nel campo della statistica che in quello dell'econometria esiste una vasta letteratura relativa al problema di ricerca di un singolo break point, mentre quello relativo a molteplici break points ha ricevuto una minore attenzione, ma crescente con il passare del tempo.

Le serie di misure che si vogliono analizzare sono relative a tronchi stradali dell'ordine di decine di chilometri di lunghezza, per questo motivo il caso da analizzare, e che vuole essere sfruttato nell'ambito delle pavimentazioni stradali, è proprio quello dell'analisi di serie con molteplici break points, denominate, nel campo econometrico, come *multiple structural change models*.

Il significato di uno structural change (cambio strutturale) in una serie può essere illustrato dalla figura 2.31, dove i valori della serie sono rappresentati mediante i punti, mentre le rette stanno ad indicare le funzioni di regressione.

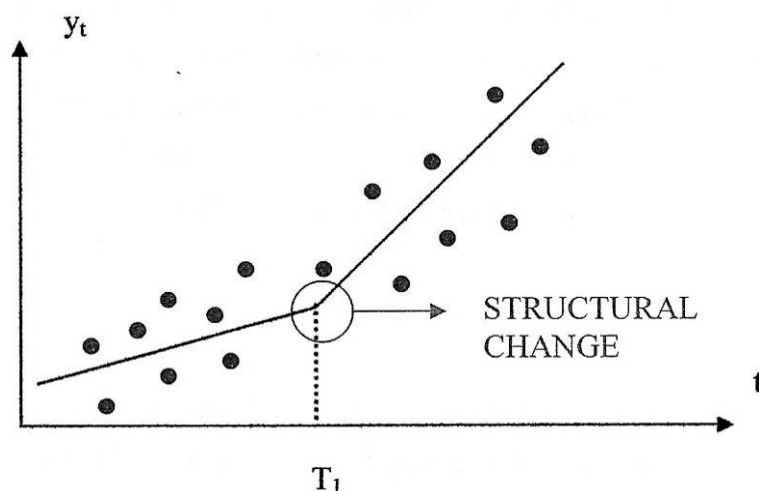


Fig. 2.31 -. Significato grafico di uno structural change

L'analisi della serie, e quindi l'individuazione dei break points in cui avvengono gli structural changes, avviene ricercando la migliore combinazione di regressioni multiple che approssima la serie, tale ricerca è basata sul principio dei minimi scarti quadratici. Il modello è stato classificato fra quelli non lineari perché procede ad un'analisi globale della serie, e non sequenziale, per individuare fra tutte le possibili partizioni quella ottimale.

Bai e Perron [22], che hanno affrontato la problematica relativa ai modelli con molteplici *break points*, propongono il seguente modello di regressione multipla con  $m$  breaks e quindi  $m+1$  segmenti:

$$y_t = x_t' \beta + z_t' \delta_j + u_t$$

per  $j = 1, \dots, m+1$  e  $t = T_{j-1} + 1, \dots, T_j$  ( $T_0 = 0, T_{m+1} = T$ )

oppure in forma matriciale:

$$Y = X\beta + \bar{Z}\delta + U$$

con

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_T)', X = (x_1, x_2, \dots, x_T)', U = (u_1, u_2, \dots, u_T)', \delta = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_T)'$$

e  $\bar{Z}$  la matrice che partiziona diagonalmente  $Z$  in corrispondenza dei break ( $T_1, T_2, \dots, T_m$ ):

$$\bar{Z} = \text{diag}(Z_1, Z_2, \dots, Z_{m+1}) \text{ con } Z_i = (z_{T_{i-1}+1}, \dots, z_{T_i}).$$

In questo modello  $y_t$  è la variabile osservata che deve essere modellata con una regressione lineare multipla;  $x_t$  e  $z_t$  sono i regressori in forma di vettori di dimensioni  $(p \times 1)$  e  $(q \times 1)$  rispettivamente;  $\beta$  e  $\delta_j$  sono i relativi coefficienti dei regressori;  $u_t$  è l'errore (per il quale si ammette anche una varianza non costante); gli indici  $(T_1, \dots, T_m)$  sono i break point considerati incogniti.

L'obiettivo è quello di stimare i coefficienti dei regressori e i break points a partire da una serie  $y_t$  contenente  $T$  misure, senza l'imposizione che la funzione di regressione sia continua in corrispondenza dei break points.

Si osservi che il parametro  $\beta$  non varia come  $\delta_j$  a seconda del segmento a cui appartiene, in questo caso si parla di *partial structural change model* nel senso che non tutti i parametri sono soggetti a variazione (shift); quando invece  $p = 0$ , ossia il vettore dei regressori  $x_t$  è identicamente nullo, si parla di *pure structural change model*, dove tutti i coefficienti subiscono variazioni.

Nella presente trattazione ci si è riferiti a questo ultimo caso. Come già accennato il metodo per stimare i coefficienti è basato sul principio dei minimi scarti quadratici, consideriamo per ora noto il valore di  $m$ , si illustreranno più avanti i metodi di stima.

Per ogni break point  $T_j$ , vengono stimati parametri  $\delta_j$  minimizzando la somma degli

$$\text{scarti quadratici: } S_T(T_1, \dots, T_m) = \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{t=T_{i-1}+1}^{T_i} (y_t - z_t' \delta_i)^2$$

Se si indica con  $\hat{\delta}(\{T_j\})$  il vettore dei coefficienti dei regressori  $z_t$  relativo alla  $m$ -partizione  $(T_1, \dots, T_m)$ , dalla sostituzione di  $\hat{\delta}(\{T_j\})$  nella funzione obiettivo  $S_T(T_1, \dots, T_m)$ , segue che gli stimatori dei break points  $(\hat{T}_1, \dots, \hat{T}_m)$  sono tali che:

$$(\hat{T}_1, \dots, \hat{T}_m) = \arg \min_{T_1, \dots, T_m} S_T(T_1, \dots, T_m)$$

$$\text{con } (\hat{T}_1, \dots, \hat{T}_m) = (\{T_j\})$$

dove la ricerca del minimo è estesa a tutte le partizioni  $(T_1, \dots, T_m)$  tali che  $T_i - T_{i-1} \geq h \geq q$ , ossia si fissa  $h$  come la lunghezza minima per un segmento individuato da 2 break points.

La minimizzazione di questa funzione potrebbe diventare molto onerosa dal punto di vista computazionale se si adotta il classico approccio della *grid search*, infatti sarebbe

---

necessario calcolare un numero di funzioni  $S_{T_i}$  ( somma degli scarti quadratici relativa al break point  $T_i$ ) dell'ordine  $O(T^m)$  se si volessero valutare m possibili break.

Gli autori invece ricorrono ad un approccio di programmazione dinamica che consente di effettuare al massimo  $O(T^2)$  operazioni [23].

L'idea base può essere illustrata per un campione con  $T = 25$  e  $m = 2$  (vedi figura 2.32).

Il massimo numero di segmenti possibili è  $\frac{T(T+1)}{2}$  ed è perciò dell'ordine  $O(T^2)$ .

In figura 2.32 i numeri verticali rappresentano i possibili punti iniziali di un segmento, quelli orizzontali sono invece i possibili punti finali; ad ogni “entrata” è associata la somma degli scarti quadratici del relativo segmento, la somma totale degli scarti quadratici per ogni possibile m-partizione si può ottenere da una combinazione lineare di queste  $\frac{T(T+1)}{2}$  somme.

In realtà si ottengono diverse riduzioni per il numero dei possibili segmenti : introducendo un valore minimo h per la lunghezza ammissibile, le possibili combinazioni si riducono ulteriormente di

$(h-1)T - (h-2)(h-1)/2$ ; richiedendo che il segmento più grande sia tale da permettere la presenza di altri m segmenti prima o dopo apporta una riduzione di  $h^2m(m+1)/2$ ; infine un break non può esistere prima di una lunghezza h, perché altrimenti il primo segmento risulterebbe minore di h, ciò causa un'ulteriore riduzione di  $T(h-1) - mh(h-1) - (h-1)^2 - (h-1)/2$ .

In figura 2.32 i simboli  $x^a$  indicano i segmenti non considerati perché minori di h,  $x^b$  quelli non considerati perché non consentirebbero altri (m+1) segmenti di lunghezza h,  $x^c$  quelli non considerati perché non si potrebbe inserire un altro segmento h prima.

		dati finali																								
dati iniziali	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
		$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
			$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
				$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
					$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
						$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
							$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
								$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
									$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
										$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
											$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
												$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
													$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
														$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
															$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																		$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																			$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																				$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																					$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																						$x^a$	$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																							$x^a$	$x^a$	$x^a$	
																								$x^a$	$x^a$	
																									$x^a$	
																										$x^a$

Fig. 2.32 -. La matrice triangolare delle somme degli scarti quadratici per  $T = 25$ ,  $h = 5$  e  $m = 2$

La computazione della matrice triangolare delle somme degli scarti quadratici può essere calcolata ricorrendo a una procedura ricorsiva:

- sia  $v(i,j)$  il residuo ricorsivo al punto  $j$  per un segmento che inizia al punto  $i$ ;
- sia  $SSR(i,j)$  la somma degli scarti quadratici per un segmento che va da  $i$  a  $j$ , ottenuta con i minimi quadrati;
- allora  $SSR(i,j) = SSR(i,j-1) + v(i,j)^2$

A questo punto, tramite un approccio tipico della programmazione dinamica, si trova la partizione corrispondente alla ottimizzazione globale, come quella che risolve il seguente problema ricorsivo:

$$SSR(\{T_{m,T}\}) = \min_{mh \leq j \leq T-h} [SSR(\{T_{m-1,j}\}) + SSR(j+1,T)]$$

La procedura inizia a calcolare la partizione ottimale relativa ad un unico break, di conseguenza viene calcolato un insieme di  $T-(m+1)h+1$  partizioni ottimali di questo tipo con associate le loro somme degli scarti quadratici, ognuna di queste partizioni corrisponde a segmenti con dati finali compresi tra  $2h$  e  $T-(m-1)h$ .

Il passo successivo è quello di valutare le partizioni ottimali con due break, che avranno elementi finali compresi tra  $3h$  e  $T-(m-2)h$ , per ognuna di queste la procedura valuta

quale delle partizioni ottimali relative ad un unico break, trovate precedentemente , possa essere inserita per avere il minimo della somma degli scarti. L'algoritmo procede sequenzialmente fino a valutare le (m-1) partizioni ottimali, l'ultimo passo è quello di valutare quale di queste garantisce il minimo quando viene aggiunto un ulteriore segmento.

Il maggiore onere computazionale è la costruzione della matrice triangolare delle somme degli scarti quadratici per tutti i possibili segmenti, la ricerca successiva della partizione ottimale apporta soltanto un costo marginale.

A questo punto, noti i break points che minimizzano la funzione obiettivo degli scarti quadratici, il vettore stimato dei coefficienti  $\hat{\delta}$  è proprio  $\hat{\delta}\left(\left\{\hat{T}_j\right\}\right)$

con  $\left(\left\{\hat{T}_j\right\}\right) \equiv \left(\hat{T}_1, \dots, \hat{T}_m\right)$ .

La stima del numero di break points m è determinata mediante l'utilizzo di diversi test statistici:

1. Test per l'ipotesi nulla  $m = 0$  contro l'ipotesi alternativa  $m = k$ .
2. Double Maximum Test
3. Test per l'ipotesi nulla  $m = l$  contro l'ipotesi alternativa  $m = l+1$ .

L'illustrazione dettagliata dei test non è d'interesse, quindi verranno descritti solo brevemente.

1. Test per l'ipotesi nulla  $m = 0$  contro l'ipotesi alternativa  $m = k$  (sup F type test)

Questo tipo di test rientra nella classe del Test-F per verificare la significatività dei coefficienti stimati in un modello di regressione multipla.

Si indica con  $(T_1, \dots, T_k)$  una partizione con k break points, con  $T_i = T \lambda_i$ , ossia i vari break points  $T_i$  sono definiti come una frazione delle misure T attraverso i coefficienti  $\lambda_i$ .

Siano:

R la matrice tale che  $(R\delta)' = (\delta'_1 - \delta'_2, \dots, \delta'_k - \delta'_{k+1})$ ;

---


$$M_x = I - X (X' X)^{-1} X' ;$$

$SSR_k$  la somma degli scarti quadratici sotto l'ipotesi alternativa dipendente dall'insieme  $(T_1, \dots, T_k)$ ;

si definisce allora

$$F_T(\lambda_1, \dots, \lambda_k; q) = \frac{(T - (k+1) \cdot q)}{k \cdot q} \cdot \frac{\hat{\delta}' R' (R(\bar{Z}' M_x \bar{Z})^{-1} R \hat{\delta})}{SSR_k},$$

e risulta

$$\sup F_T(k; q) = \sup_{(\lambda_1, \dots, \lambda_k) \in \Delta_\varepsilon} F_T(\lambda_1, \dots, \lambda_k; q) \text{ con}$$

$$\Delta_\varepsilon = \{(\lambda_1, \dots, \lambda_k); |\lambda_{i+1} - \lambda_i| \geq \varepsilon, \lambda_1 \geq \varepsilon, \lambda_k \leq 1 - \varepsilon\}.$$

L'introduzione dell'intervallo  $\Delta_\varepsilon$ , con  $\varepsilon$  valore arbitrario positivo abbastanza piccolo, è dovuta alla necessità di imporre alcune restrizioni sui valori possibili dei break points, in particolare bisogna imporre che ogni break sia distinto dai valori estremi della serie considerata; con il parametro  $\varepsilon$  (trimming value) si fissa la lunghezza minima  $h$  di ogni segmento pari a  $\varepsilon T$ .

La formulazione del sup F type test appena citata si semplifica se si rimuove l'ipotesi di errori non correlati [22].

Gli autori hanno ottenuto i valori critici per la statistica  $\sup F(\lambda_1, \dots, \lambda_k; q)$  relativamente a diversi valori di  $\varepsilon$ , i test risultano significativi quando i valori calcolati dalla funzione obiettivo sono maggiori dei valori critici.

Nella tabella 4 si riportano i valori critici per i casi fino a 9 break points e 10 regressori con  $\varepsilon = 0.05$ .

ASYMPTOTIC CRITICAL VALUES OF THE MULTIPLE-BREAK TEST. THE ENTRIES ARE QUANTILES $x$ SUCH THAT $P(\sup F_{k,q} \leq x/q) = \alpha$ .												
$q$	$\alpha$	Number of Breaks, $k$									UDmax	WDmax
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	.90	8.02	7.87	7.07	6.61	6.14	5.74	5.40	5.09	4.81	8.78	9.14
	.95	9.63	8.78	7.85	7.21	6.69	6.23	5.86	5.51	5.20	10.17	10.91
	.975	11.17	9.81	8.52	7.79	7.22	6.70	6.27	5.92	5.56	11.52	12.53
	.99	13.58	10.95	9.37	8.50	7.85	7.21	6.75	6.33	5.98	13.74	15.02
2	.90	11.02	10.48	9.61	8.99	8.50	8.06	7.66	7.32	7.01	11.69	12.33
	.95	12.89	11.60	10.46	9.71	9.12	8.65	8.19	7.79	7.46	13.27	14.19
	.975	14.53	12.64	11.20	10.29	9.69	9.10	8.64	8.18	7.80	14.69	16.04
	.99	16.64	13.78	12.06	11.00	10.28	9.65	9.11	8.66	8.22	16.79	18.11
3	.90	13.43	12.73	11.76	11.04	10.49	10.02	9.59	9.21	8.86	14.05	14.76
	.95	15.37	13.84	12.64	11.83	11.15	10.61	10.14	9.71	9.32	15.80	16.82
	.975	17.17	14.91	13.44	12.49	11.75	11.13	10.62	10.14	9.72	17.36	18.79
	.99	19.25	16.27	14.48	13.40	12.56	11.80	11.22	10.67	10.19	19.38	20.81
4	.90	15.53	14.65	13.63	12.91	12.33	11.79	11.34	10.93	10.55	16.17	16.95
	.95	17.60	15.84	14.63	13.71	12.99	12.42	11.91	11.49	11.04	17.88	19.07
	.975	19.35	16.85	15.44	14.43	13.64	13.01	12.46	11.94	11.49	19.51	20.89
	.99	21.20	18.21	16.43	15.21	14.45	13.70	13.04	12.48	12.02	21.25	22.81
5	.90	17.42	16.45	15.44	14.69	14.05	13.51	13.02	12.59	12.18	17.94	18.85
	.95	19.50	17.60	16.40	15.52	14.79	14.19	13.63	13.16	12.70	19.74	20.95
	.975	21.47	18.75	17.26	16.13	15.40	14.75	14.19	13.66	13.17	21.57	23.04
	.99	23.99	20.18	18.19	17.09	16.14	15.34	14.81	14.26	13.72	24.00	25.46
6	.90	19.38	18.15	17.17	16.39	15.74	15.18	14.63	14.18	13.74	19.92	20.89
	.95	21.59	19.61	18.23	17.27	16.50	15.86	15.29	14.77	14.30	21.90	23.27
	.975	23.73	20.80	19.15	18.07	17.21	16.49	15.84	15.29	14.78	23.83	25.22
	.99	25.95	22.18	20.29	18.93	17.97	17.20	16.54	15.94	15.35	26.07	27.63
7	.90	21.23	19.93	18.75	17.98	17.28	16.69	16.16	15.69	15.24	21.79	22.81
	.95	23.50	21.30	19.83	18.91	18.10	17.43	16.83	16.28	15.79	23.77	25.02
	.975	25.23	22.54	20.85	19.68	18.79	18.03	17.38	16.79	16.31	25.46	26.92
	.99	28.01	24.07	21.89	20.68	19.68	18.81	18.10	17.49	16.96	28.02	29.57
8	.90	22.92	21.56	20.43	19.58	18.84	18.21	17.69	17.19	16.70	23.53	24.55
	.95	25.22	23.03	21.48	20.46	19.66	18.97	18.37	17.80	17.30	25.51	26.83
	.975	27.21	24.20	22.41	21.29	20.39	19.63	18.98	18.34	17.78	27.32	28.98
	.99	29.60	25.66	23.44	22.22	21.22	20.40	19.66	19.03	18.46	29.60	31.32
9	.90	24.75	23.15	21.98	21.12	20.37	19.72	19.13	18.58	18.09	25.19	26.40
	.95	27.08	24.55	23.16	22.08	21.22	20.49	19.90	19.29	18.79	27.28	28.78
	.975	29.13	25.92	24.14	22.97	21.98	21.28	20.59	19.98	19.39	29.20	30.82
	.99	31.66	27.42	25.13	24.01	23.06	22.18	21.35	20.63	19.94	31.72	33.32
10	.90	26.13	24.70	23.48	22.57	21.83	21.16	20.57	20.03	19.55	26.66	27.79
	.95	28.49	26.17	24.59	23.59	22.71	21.93	21.34	20.74	20.17	28.75	30.16
	.975	30.67	27.52	25.69	24.47	23.45	22.71	21.95	21.34	20.79	30.84	32.46
	.99	33.62	29.14	26.90	25.58	24.44	23.49	22.75	22.09	21.47	33.86	35.47

Notes: 1. The test UDmax is defined as  $\max_{1 \leq k \leq 5} \sup_{(\lambda_1, \dots, \lambda_k) \in \Lambda_k} F(\lambda_1, \dots, \lambda_k; q)$  multiplied by  $q$ . 2. The test WDmax is given in (9) multiplied by  $q$ , and  $M$  is chosen to be 5.

**Tabella 2** - Valori critici per il test F per  $\epsilon=0.05$

## 2. Double Maximum Test

Il test precedentemente illustrato prevede la specificazione del numero di breaks  $m$  nell'ipotesi alternativa, il che può sembrare poco conveniente in molte applicazioni, per ovviare a ciò gli autori propongono un test per verificare l'ipotesi nulla  $m = 0$  contro l'ipotesi alternativa di un numero  $m$  incognito con massimo  $M$ .

Si deve introdurre a questo proposito la seguente classe di tests, chiamati *double maximum tests*:

$$Dmax F_T(M, q, a_1, \dots, a_m) = \max_{1 \leq m \leq M} a_m \cdot \sup_{(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \in \Lambda_m} F_T(\lambda_1, \dots, \lambda_m; q)$$

definito per un insieme di "pesi"  $\{a_1, \dots, a_m\}$ .



Questi pesi, secondo le ipotesi degli autori, possono riflettere qualche imposizione a priori sulla influenza di vari numeri di breaks.

Il primo test prevede che tutti i pesi  $\{ a_1, \dots, a_m \}$  siano uguali all'unità:

$$UD \max F_T(M, q) = \max_{1 \leq m \leq M} 1 \cdot \sup_{(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \in \Delta_\varepsilon} F_T(\lambda_1, \dots, \lambda_m; q)$$

Il secondo test prevede che i pesi  $\{ a_1, \dots, a_m \}$  dipendano dal numero di regressori  $q$  e

dal livello di significatività  $\alpha$  del test, con  $a_1 = 1$  e  $a_m = \frac{c(q, \alpha, 1)}{c(q, \alpha, m)}$

$$WD \max F_T(M, q) = \max_{1 \leq m \leq M} \frac{c(q, \alpha, 1)}{c(q, \alpha, m)} \cdot \sup_{(\lambda_1, \dots, \lambda_m) \in \Delta_\varepsilon} F_T(\lambda_1, \dots, \lambda_m; q)$$

I valori critici per questi due test sono riportati nella tabella 2 per  $M = 5$  e  $\varepsilon = 0.05$ , analogamente a prima i test sono validi se i valori UD e WD calcolati sono maggiori dei valori critici.

### 3. Test per l'ipotesi nulla $m = l$ contro l'ipotesi alternativa $m = l + 1$ .

Gli autori denominano questo test  $F_T(l+1/l)$ ; per il modello con  $l$  break points, l'insieme  $(T_1, \dots, T_l)$  è quello derivato dalla minimizzazione globale della somma degli scarti quadratici, su ogni segmento  $(l+1)$  viene effettuato poi un test per verificare la presenza di un break point addizionale; in sostanza esso consiste nell'applicazione di  $(l+1)$  volte il test per l'ipotesi nulla  $m = 0$  contro l'ipotesi alternativa  $m = 1$ .

Il test viene applicato ad ogni segmento contenente le misure comprese tra gli indici

$\hat{T}_{i-1}$  e  $\hat{T}_i$  per  $i$  che va da 1 a  $l+1$ .

Il metodo proposto stima il numero di break points basandosi sull'applicazione sequenziale del test  $F_T(l+1/l)$  si parte considerando un numero di break points minimo necessario, oppure nullo, e si procede aggiungendo un break point quando viene rifiutata l'ipotesi  $l=0$ ; il processo è ripetuto aumentando il valore  $l$  finché il test non accetta l'ipotesi nulla. L'ipotesi nulla è accettata quando il valore  $F_T(l+1/l)$  calcolato

---

risulta inferiore al valore critico relativo a  $k=l$ , questi valori critici sono riportati per diversi livelli di significatività ( $\alpha = 1\%$ ,  $\alpha = 2,5\%$ ,  $\alpha = 5\%$ ,  $\alpha = 10\%$ ).

Il procedimento proposto da Bai e Perron risulta molto rigoroso dal punto di vista statistico grazie all'utilizzo di diversi test, inoltre permette il controllo della lunghezza minima  $h$  dei segmenti individuati, che solitamente è posta pari a  $\varepsilon^*T$ . Lo svantaggio potrebbe essere che il valore  $m$  massimo per cui si possono ricercare i break points è nove, un punto di forza è invece quello di avere la possibilità di considerare un qualsiasi numero  $q$  di regressori come variabili rappresentative della variabile osservata.

## 2.7.4 ALTRI METODI PRESENTI IN LETTERATURA

### *MINSSE*

La metodologia che si va ora ad illustrare [25] ha come obiettivo principale quello di selezionare, tra tutti i possibili change points, quelli che minimizzano la somma degli scarti quadratici.

Le sezioni omogenee risultanti da questa selezione dovranno comunque soddisfare i due vincoli, già illustrati nei metodi precedenti, di lunghezza minima  $L_{\min}$  e differenza significativa dei valori medi  $\Delta_{\min}$ .

La serie di misure può avere  $k$  ( $k < n$ ) change points, considerando tutte le possibili posizioni per i change points si ottiene l'insieme:

$$k_k = \{ (r_1, r_2, \dots, r_k) : 0 < r_1 < r_2 < \dots < r_k < n \}.$$

A ciascun elemento dell'insieme corrisponde una particolare partizione delle  $n$  misure, la cui unione fornisce complessivamente  $k + 1$  segmenti,

$$S_1 = \{x_1, \dots, x_{r_1}\}, S_2 = \{x_{r_1+1}, \dots, x_{r_2}\}, \dots, S_{k+1} = \{x_{r_k+1}, \dots, x_n\}.$$

Ogni partizione è caratterizzata da un valore medio  $\overline{X_{S_i}}$ , quindi può essere definita per ognuna di esse la somma degli scarti quadratici:

$$SSE(j) = \sum_{i \in S_j} (x_i - \bar{X}_{S_j})^2 ;$$

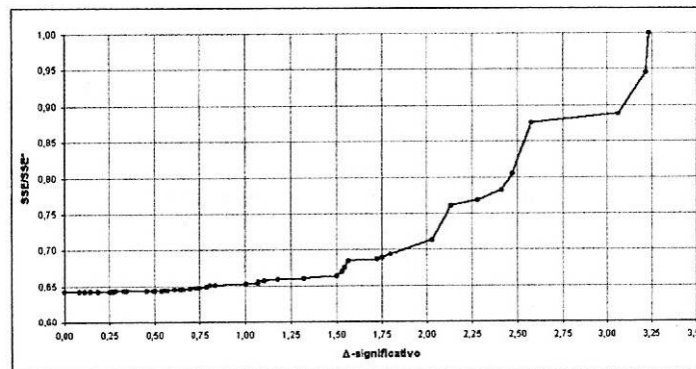
da cui deriva la definizione della somma degli scarti quadratici totale della serie, per una specifica partizione con k change points:

$$SSE_k = \sum_{j=1}^{k+1} \sum_{i \in S_j} (x_i - \bar{X}_{S_j})^2 .$$

Il numero di tutti i possibili change points è determinato in base al vincolo della lunghezza minima richiesta per la sezione omogenea: dato  $p = \text{int} \frac{L}{L_{\min}}$ , il numero massimo dei change points è (p-1).

Dati i valori  $SSE_k$  per  $k = 0, 1, \dots, p-1$ , si valuta il valore minimo, i break point cercati sono quelli corrispondenti a tale valore minimo; la procedura prevede inoltre una aggregazione delle tratte le cui medie non soddisfano il test-t di Student, ed una ulteriore in base al rispetto del vincolo  $\Delta_{\min}$ .

Dato che il metodo risulta fortemente condizionato dalla scelta del parametro  $\Delta_{\min}$ , è stata implementata una procedura di supporto alla scelta, mediante la quale è possibile verificare l'andamento del rapporto tra le SSE delle segmentazioni ottenute al variare del  $\Delta_{\min}$  e la  $SSE^*$  dell'intera serie di dati senza change point; dalla figura 2.33 si può vedere come per il campione in esame (dati di regolarità longitudinale, Rut depht) il rapporto  $SSE/SSE^*$  non risulta condizionato dalla scelta di  $\Delta_{\min}$  fino a valori pari a 0,5 mm, per poi aumentare considerevolmente per valori maggiori di 1,5 mm.



**Fig. 2.33** - Variazione del rapporto  $SSE/SSE^*$  in funzione del  $\Delta$  significativo

---

Da altri studi [25] è stato rilevato che la metodologia segue in maniera microscopica la serie di dati, ma risulta molto sensibile alla tipologia di attributo esaminato.

### ***RUBENSAUM E SCHÜLZE***

La procedura illustrata da Rubensaum e Schülze [26] prevede un trattamento preliminare (smoothing) dei dati da analizzare prima di passare alla vera e propria individuazione delle sezioni omogenee.

La serie di misure iniziali viene trasformata calcolando la media mobile su  $2q+1$  elementi (sliding mean values), ossia viene effettuata la media aritmetica per ogni valore  $x_i$  e un numero  $q$  di misure adiacenti, sia a destra che a sinistra; la serie trasformata che si ottiene è:

$$y_i = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=i-q}^{j=i+q} x_j \quad \text{per} \quad i = q+1, \dots, n-q.$$

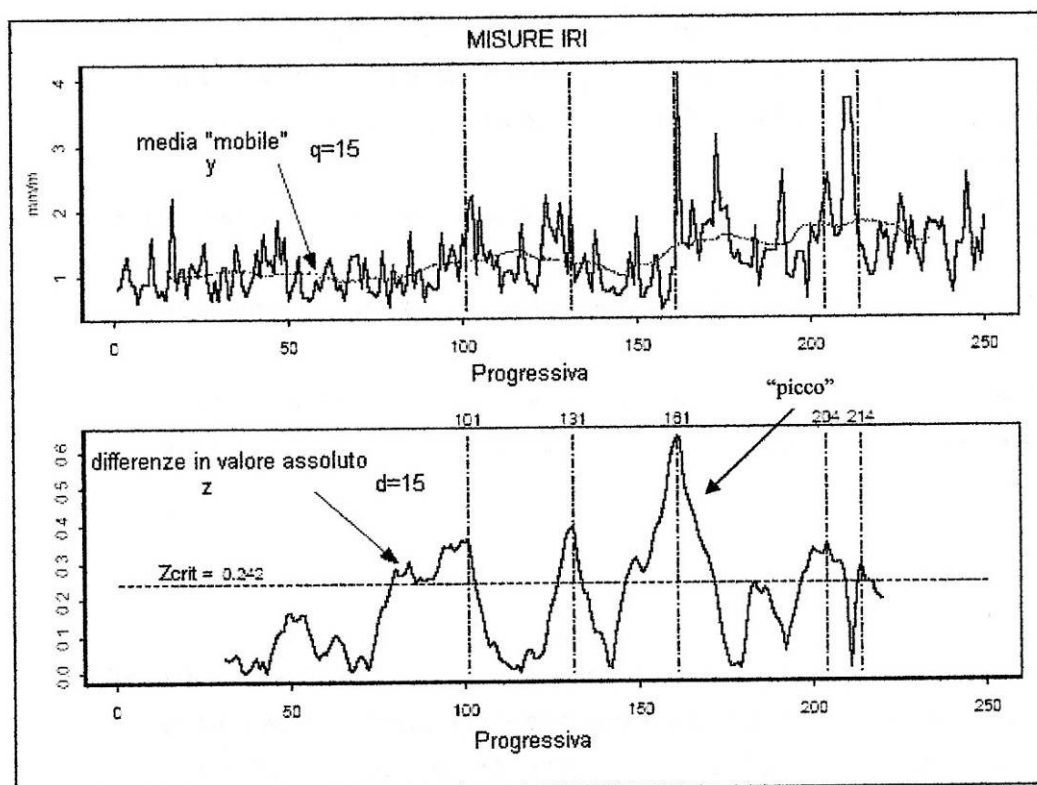
Successivamente a partire da questi valori  $y_i$  viene calcolato il valore assoluto della differenza tra i valori distanti  $d$  misure dal valore generico  $y_i$ , ottenendo l'ulteriore serie:

$$z_i = |y_{i-d} - y_{i+d}| \quad \text{per} \quad i = d+q+1, \dots, n-q-d$$

L'insieme dei dati  $z$  contiene solo  $n-2(q+d)$  elementi, quindi non potranno essere individuati break points all'inizio e alla fine della serie di misure originarie  $x_i$ , perché in particolare vengono ignorati i primi e gli ultimi  $(d+q)$  valori.

Dopo aver ottenuto la serie trasformata  $z_i$ , i break point vengono individuati fissando un valore di soglia  $z_{crit}$ : i valori della serie  $z_i$  minori di questo ultimo vengono ignorati, mentre vengono selezionati come change points i punti in corrispondenza dei picchi che eccedono il valore  $z_{crit}$ , il risultato si può osservare in figura 2.34.

Il numero di punti individuati non è una funzione decrescente del valore di soglia  $z_{crit}$ , infatti sia un abbassamento che un innalzamento può portare alla selezione di un nuovo change point, questo perché molto dipende dalla forma dei picchi che caratterizza la serie dei valori  $z_i$ , che deve essere il più possibile di tipo “unimodale”.



**Fig. 2.34** - Esempio di individuazione dei break points con il metodo proposto da Rubensaum e Schölze

Questo approccio necessita quindi della scelta di tre parametri: la misura dell'intervallo per la media mobile  $q$ , il valore  $d$  per calcolare le differenze assolute e il valore di soglia  $z_{crit}$ . Mentre i primi due aspetti possono essere concettualmente semplici, il valore critico per  $z$  non è facile da determinare; ciò determina una scarsa applicabilità del metodo, che non può fornire risultati sempre veritieri, dato che il valore di soglia scelto influenza molto il numero di sezioni omogenee individuate.

---

## CAPITOLO III

### ***LE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE, CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA E CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI***

#### **3.1. PREMESSA**

Le pavimentazioni lapidee, ancora in uso in molte strade urbane, possono essere formate da elementi di pietra di forma parallelepipedica, i quali secondo le dimensioni vengono denominati masselli o cubetti, oppure da ciottoli arrotondati ma questa è una tipologia meno diffusa.

Questi elementi si sovrappongono agli strati portanti della pavimentazione di tipo flessibile o rigido, mediante l'interposizione di uno strato di malta o meglio di sabbia; i giunti fra gli elementi vengono sigillati generalmente con bitume.

Masselli o cubetti non hanno alcuna funzione portante, essendo del tutto slegati fra loro, ma soltanto compito di strato di usura, che riescono a esplicare talvolta con grande efficacia, come nel caso dei cubetti di porfido che conservano la rugosità iniziale per un tempo praticamente illimitato.

Il compito di resistere alle azioni verticali trasmesse dai veicoli deve essere invece assolto integralmente dagli strati sottostanti della sovrastruttura, i quali possono essere formati da una lastra di calcestruzzo, ovvero da una normale pavimentazione di tipo flessibile, privata però degli strati di binder e di usura.

Le pavimentazioni lapidee sono molto belle ed eleganti possono avere una vita utile molto lunga, se gli strati portanti sono adeguatamente proporzionati.

Il loro principale inconveniente consiste nella impossibilità di meccanizzarne sia la costruzione sia la manutenzione, le quali rimangono ancora oggi un lavoro artigianale, lungo e costoso.

---

## **3.2 PAVIMENTAZIONI LAPIDEE TRADIZIONALI**

La presenza di ciò che rimane delle pavimentazioni lapidee storiche, nei centri urbani e nel paesaggio, fa nascere quotidianamente l'esigenza culturale del loro recupero.

Ciò non solo come loro doverosa manutenzione, recupero e valorizzazione, ma proprio come attuale reimpiego (seppur in senso moderno) di tecnologie spesso considerate obsolete e non rispondenti più ai requisiti corrispondenti alle pavimentazioni.

Qui di seguito sono elencate le tipologie di pavimentazioni lapidee più diffuse nei centri urbani e le loro relative modalità di realizzazione[1].

### **3.2.1 L'ACCIOTTOLATO**

L'acciottolato si è diffuso nel XVIII secolo soprattutto nelle città per garantire un opportuno drenaggio stradale delle acque meteoriche e un uso più comodo dei percorsi pedonali e veicolari.

Attualmente l'acciottolato può essere impiegato in alcuni casi proprio per contrastare l'elevato livello di impermeabilizzazione causato dalle grandi superfici urbane asfaltate. Ciò soprattutto in corrispondenza di parchi e giardini delle città e in tutti quei dove accorra garantire la traspirazione del terreno vicino ad alberature o ad altre presenze vegetali.

La realizzazione dell'acciottolato è di rapida esecuzione ed il materiale di facile reperimento. Infatti, si tratta di procurare ciottoli arrotondati (di fiume, di cava o di mare) che costituiscono gli elementi già pronti per la posa in opera.

L'unica accortezza riguarda un opportuno loro lavaggio e pulitura da parti terrose o saline ed una loro selezione sia in base ad eventuali fratture, sia in base alle dimensioni richieste. La forma oblunga è generalmente di dimensioni comprese tra i 9-12cm per l'asse maggiore e 6-8cm per quello minore.

In Italia è da notare che le rocce più resistenti, come i porfidi e i graniti, presenti nell'arco alpino, producono ciottoli di forma tendenzialmente sferica; da rocce stratificate, come le arenarie silicee ed i calcari dell'area appenninica, derivano invece ciottoli le cui forme possono andare dal tronco di cono all'ovoide molto piatto.

Inoltre è bene sottolineare, che questo tipo di pavimentazione può essere adottato insieme ad elementi tipici di altre tipologie di pavimentazione, come lastre, masselli e cordoni, impiegati per realizzare riquadrature.

Le diverse tipologie di pavimentazioni in acciottolato sono di seguito elencate [1].

---

### **Acciottolato a secco.**

La fondazione dell'acciottolato è costituita tradizionalmente da terra compatta mediante pilonatura o cilindratura; tale costipazione deve essere eseguita con abbondante bagnatura.

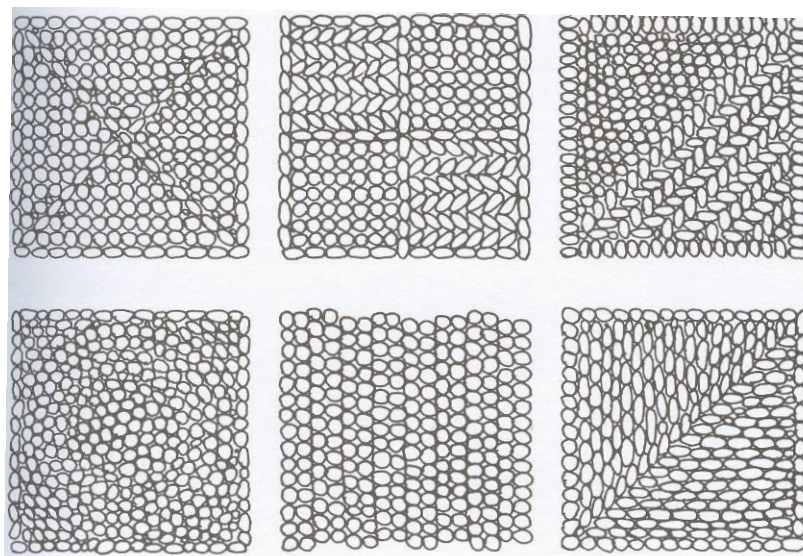
Eseguita la costipazione si stende uno strato di sabbia a grana grossa e non vagliata di 8-10cm, nel quale viene affondato a mano un ciottolo in modo che l'asse maggiore risulti verticale e con la parte appuntita verso il basso.

L'operazione viene eseguita scavando una piccola fossa con la penna di un martello e, quindi, l'elemento viene battuto assestandolo con il medesimo attrezzo.

Si procede quindi alla posa dei ciottoli successivi in modo serrato e badando che le teste sporgano in modo uniforme.

Generalmente si posano i ciottoli di maggiori dimensioni al centro della strada e quelli più piccoli nelle fasce laterali.

Quando i ciottoli a disposizione presentano forme e pezzature regolari, è possibile adottare geometrie di posa con andamento a disegno (Fig.3.1).



**Fig. 3.1.-** Varie geometrie di posa dell'acciottolato realizzabili con elementi di forme e pezzature regolari.

Si esegue il costipamento della pavimentazione mediante più fasi di battitura impiegando un pestello di legno (mazzapicchio) in modo da non spaccare o lesionare i ciottoli.

Ultimata la prima battitura il manto viene cosparso di sabbia bagnata e, procedendo ad ulteriori costipazioni la superficie viene irrorata d'acqua in modo da lubrificare la sabbia facendola penetrare nei vuoti e negli interstizi tra gli elementi.



---

Battiture successive garantiscono una disposizione piana e regolare della superficie nonché un forte contrasto laterale tra gli elementi.

Non sempre i ciottoli vengono disposti in senso verticale nel letto di sabbia; a volte, quando le condizioni di sollecitazione previste lo consentono (soprattutto nelle aree pedonali), gli elementi possono essere disposti di piatto o di costa.

Soprattutto in quest'ultimo caso, è possibile raggiungere effetti decorativi di alto pregio. Generalmente nelle pavimentazioni in acciottolato, in considerazione della loro scarsa impermeabilizzazione, ma anche per ottenere effetti decorativi, si ricorre a particolari disposizioni degli elementi.

Pertanto i ciottoli vengono posati con l'asse maggiore inclinato secondo la direzione di pendenza della pavimentazione, in modo da convogliare le acque meteoriche e di lavaggio, nelle apposite caditoie previste dal sistema di drenaggio.

Rientrano nella categoria degli acciottolati a secco ossia gli acciottolati caratterizzati da una disposizione a secco degli elementi, il mosaico e le pavimentazioni in pietra e acciottolato [1].

### **Mosaico.**

La pavimentazione a mosaico (o tassellato), ovvero a tessere quadrate regolari (in genere di 1-2 cm di lato), è oggi raramente adottata non solo per l'elevato costo di realizzazione, ma anche per quello di manutenzione.

Tale pavimentazione è comunque di natura poco accessibile anche per la sua superficie di marcia che tende a lucidarsi (a causa dei litoti impiegati marmi e calcari compatti) e della conseguente scivolosità, specialmente in caso di bagnato.

### **Pavimentazione in pietra e acciottolato.**

Questo tipo di pavimentazione definisce il percorso in differenti fasce realizzate in lastricato di pietra e acciottolato.

E' il caso di pedonali in lastricato con fasce in acciottolato per creare motivi figurativi di elevato pregio pur permettendo una comoda percorribilità ai pedoni.

Quasi sempre le pavimentazioni stradali in acciottolato erano interrotte e ripartite da listoni di pietra (graniti, arenarie silicee, calcari compatti, ecc.) in modo da creare guide.

Tali percorsi erano indispensabili sia per diminuire la sonorità dell'acciottolato quando veniva percorso da ruote ferrate, sia per attenuare l'usura del manto, i cui ciottoli con il tempo dovevano essere sostituiti o ripristinati nella loro posizione iniziale.

---

Su tali strade le ruote dei veicoli scorrevano sulle resistenti e uniformi superfici dei lastroni di pietra e l'acciottolato centrale, con la sua scabrosità, offriva un'opportuna presa agli zoccoli ferrati degli animali da tiro.

Attualmente le pavimentazioni di pietra ed acciottolato, pur non dovendo più presentare i requisiti necessari per la percorrenza delle carrozze e dei relativi animali da tiro, conservano tutto il loro fascino nella figuratività urbana, facendo ormai parte della memoria storica collettiva.

I listoni in pietra, non dovendo più rispondere a necessità strettamente funzionali, sono finalmente liberi di disporsi secondo altre esigenze più legate all'estetica ambientale.

Ciò è vero anche se lo schema classico delle guide in pietra è tuttora valido, permettendo comunque ai veicoli di percorrere occasionalmente e quando previsto, le pavimentazioni pedonali, evitando così di usare l'acciottolato che nei tempi lunghi potrebbe danneggiarsi, anche se percorso saltuariamente dai moderni veicoli a motore.

In ogni caso l'acciottolato rappresenta per la sua scabrosità un manto poco appropriato per la carrabilità, anche se occasionale.

Lo schema tradizionale di questo tipo di pavimentazione è costituito da un acciottolato interrotto al centro della strada da due fasce, formate da elementi (o lastroni) di pietra larghi 50-60cm e distanziati di un metro dai bordi interni.



**Fig.3.2** - Pavimentazione in pietra e acciottolato:percorsi carrabili.

In generale la superficie di marcia viene lavorata in spuntato fine, o bocciardato medio-fine.

---

Nella prima fase si procede alla posa dei materiali che costituiscono le guide e solo dopo all'acciottolato.

Sul sottofondo predisposto ed opportunamente modellato secondo le livellette, si procede a stendere uno strato di sabbia dallo spessore di 8-10cm in corrispondenza della posa delle guide di pietra.

I lastroni devono essere posti in opera ben assestati e serrati tra di loro costipandoli con mazzaranghe di legno del peso di almeno 15 Kg in quanto saranno soggetti a carrabilità. Successivamente si procede alla posa in opera dell'acciottolato come descritto prima [1].

### **La selciata di calce.**

Questo tipo di pavimentazione è più economica in quanto per la sua realizzazione viene impiegato del materiale di minor pregio e una manodopera meno costosa.

Per la realizzazione di tale pavimentazione venivano impiegati frammenti derivati da avanzi di lavorazioni di varie forme e dimensioni o ciottoli più piccoli di quelli usati nelle selciate a secco.

Tale pavimentazione era molto diffusa soprattutto per i percorsi con forte pendenza e veniva realizzata su di un sottofondo preparato come quello predisposto per l'acciottolato a secco.

Su tale sottofondo, livellato con ghiaia, si realizzava un massetto di scaglie di pietra e malta magra di calce.

Lo strato di supporto superficiale era costituito da un letto di malta di 10-20 cm di spessore nel quale venivano disposti gli elementi lapidei.

Generalmente nelle selciate di calce, soprattutto se realizzate con elementi di piccola dimensione, si procedeva al frazionamento della superficie da pavimentare mediante guide, in modo da suddividerla in settori regolari al fine di facilitarne l'esecuzione ed ottenere inoltre effetti decorativi.

La selciata non presentava una rapida messa in servizio, infatti alla malta di calce occorreva un certo tempo per consolidarsi.

Pertanto era necessario ricoprire provvisoriamente la pavimentazione con sabbia e terra. Attualmente si ricorre a quella che può definirsi la moderna selciata di calce realizzata con appropriato sottofondo in massicciata o cemento (anche armate con reti elettrosaldate) e letto di calcestruzzo [1].

---

### 3.2.2 IL SELCIATO

Il selciato rappresenta un'evoluzione tecnologica dell'acciottolato e può essere considerato come un tipo di pavimentazione intermedio tra l'acciottolato ed il lastricato. Il selciato è costituito da elementi lapidei di forma cubica o parallelepipedica; generalmente la faccia in vista, o di marcia, è quadrata.

Nel passato questi elementi venivano ricavati dalle lastre di roccia con mazzetta e scalpello largo. Oggi tale lavorazione si esegue a macchina mediante un maglio a lame.

La superficie di marcia è lasciata grezza e corrisponde al piano di cava (o pioda) mentre le pareti laterali ricavate per frattura sono inclinate verso il piano di posa a formare un tronco di piramide allungato con dimensioni in genere normalizzate.

Le prime pavimentazioni di questo tipo sono state realizzate in Europa nella seconda metà del XIX secolo. In particolare i primi cubetti di granito (circa 10x10) sono stati usati nella pavimentazione della città di Hannover nel 1880.

Ma la grande diffusione in Europa è avvenuta solo dopo la prima guerra mondiale.

Attualmente l'impiego del granito in cubetti (molto spesso del tipo 8/10cm) è particolarmente diffuso nel nord Europa in nazioni come la Francia, la Germania e la Svezia.

In Portogallo e in Brasile è invece molto diffuso l'impiego di elementi a due colorazioni (nera e bianca) ricavati dal basalto e dal calcare, con i quali vengono creati motivi a disegno nelle pavimentazioni di strade e marciapiedi.

In Italia probabilmente l'impiego più antico è rappresentato a Roma dal quadruccio, o sampietrino (a testa quadrata di 9,5 cm di lato e di altezza di 18 cm), ricavato dalla lava basaltica dei Colli Albani.

Dalla lava del Vesuvio sono stati ricavati gli elementi per molti selciati di Napoli e, da quelli dell'Etna, quelli impiegati in molti centri della Sicilia orientale.

Altre rocce dalle quali sono stati ricavati cubetti sono state il Granito dell'isola di Giglio, la Sienite e la Diorite del Lago di Como e la trachite dei Colli Euganei.

Ma il materiale più usato fin dal 1880 è il porfido la cui diffusione è avvenuta dopo la prima guerra mondiale con l'attivazione delle prime cave di Albiano (TN).

Una delle più importanti pavimentazioni in porfido (rosso) è Via Nazionale a Roma realizzata nel 1930 e che ancora negli anni Cinquanta si presentava in buono stato(Fig.3.3.).



**Fig. 3.3-**Selciato in porfido rosso ad archi contrastanti.

### **Tipi di apparecchiature.**

Ai fini funzionali ed estetici è di fondamentale importanza la scelta dell'apparecchiatura che, in genere può essere ad archi contrastanti, a redans, a coda di pavone, a corsi regolari.

In particolare la soluzione ad archi contrastanti è la soluzione più impiegata, soprattutto per le superfici carrabili.

Infatti l'arco è l'elemento costruttivo più adatto a sopportare forti carichi e spinte che, in questo caso, vengono trasmesse nella direzione orizzontale verso il perimetro laterale del percorso stradale.

L'arco si definisce contrastante in quanto si pone in una condizione di contrasto con il suo vicino e rispettivamente con i fianchi della strada.

Un altro motivo per il quale si ricorre all'impiego dell'arco e che favorisce una migliore e più razionale esecuzione è determinato dalla nota diversità dei singoli elementi, dove i più piccoli verranno posti in opera agli incroci e i più grandi al centro.

Nell'apparecchiatura ad archi contrastanti i cubetti o elementi di ogni fila vengono posti secondo una serie di archi di cerchio di raggio costante e sono disposti in modo che ogni coppia di archi affiancati abbia in comune l'elemento d'imposta.

Per ottenere ciò occorre che l'angolo al centro sia di  $90^\circ$ , che gli spigoli dei cubetti crescano dall'imposta alla chiave di volta e che lo spigolo S del cubetto di chiave sia uguale (all'incirca) alla diagonale S del cubetto d'imposta (Fig.3.4).

Poiché la faccia dei cubetti è quadrata e non trapezia è evidente che i giunti dei cubetti di un arco non saranno rettangolari, ma piuttosto aperti e divergenti verso l'esterno dell'arco. Per limitare questa divergenza è opportuno che gli archi non contengano più di 20 cubetti, cosicché la divergenza sarà limitata in modo da passare inosservata.

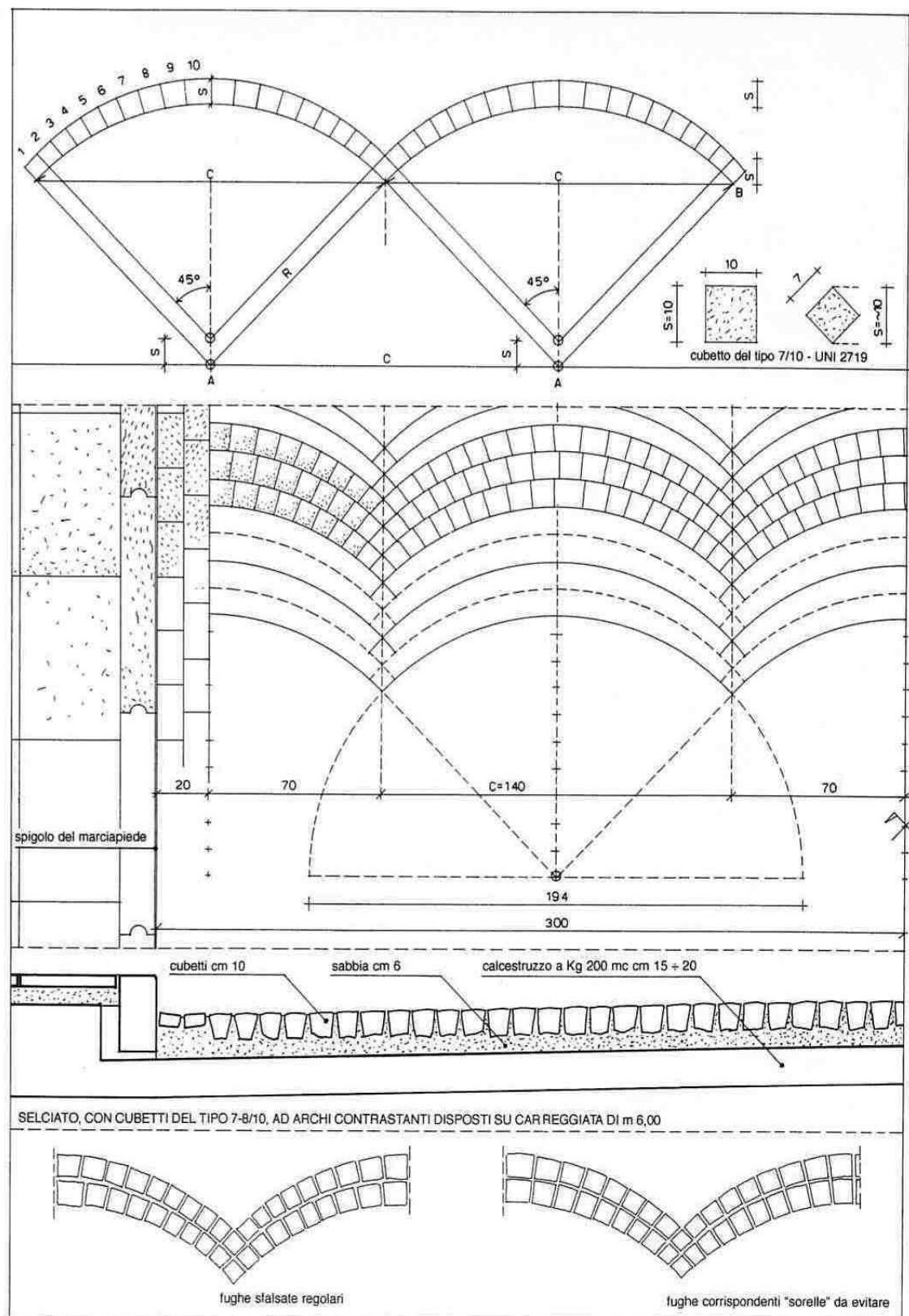
Un aspetto da tener presente è che a determinate dimensioni dei cubetti corrispondono determinati valori del raggio dell'arco, della corda e quindi dello sviluppo dell'arco.

Tali valori sono riportati nella Tab. 1 per gli assortimenti UNI 2719 relativi ai cubetti.

**Tab. I** Apparecchiatura ad archi contrastanti. Valori geometrici per assortimento UNI 2719

Assortimento UNI 2719	Valore del raggio in cm	Valore della corda in cm	Sviluppo dell'arco in cm
4/6	58 ÷ 72	80 ÷ 105	90 ÷ 120
6/8	78 ÷ 96	110 ÷ 135	120 ÷ 150
7/10	97 ÷ 120	140 ÷ 170	155 ÷ 190
9/12	120 ÷ 143	165 ÷ 200	185 ÷ 225

**Tab. 1:** assortimenti UNI 2719 relativi ai cubetti



**Fig. 3.4** - Apparecchiatura ad archi contrastanti per pavimentazioni in selciato.

L'apparecchiatura ad archi contrastanti presenta un inconveniente in quanto nelle linee di imposte degli archi si trovano gli elementi più piccoli e quindi di minor resistenza.

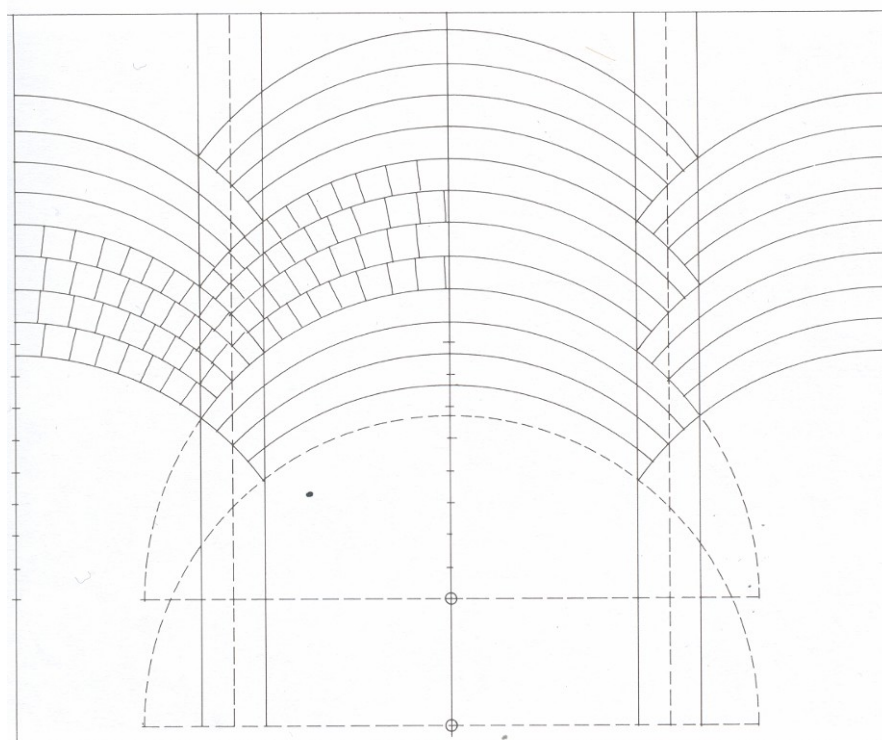


---

Tali elementi, essendo disposti in fila e in direzione parallela a quella dell'asse stradale, sono soggetti a sconnettersi per le sollecitazioni continue del traffico.

Per eliminare tale inconveniente è possibile ricorrere all'apparecchiatura a redans nella quale gli archi, in punti più o meno distanti dall'imposta dei medesimi, vengono troncati, al fine di permettere l'inserimento degli archi contigui egualmente troncati.

In tal modo i cubetti più piccoli non si trovano più allineati, ma sono disposti a spina di pesce in una fascia di determinata larghezza e presentano, quindi, una maggiore resistenza alle sollecitazioni del traffico (Fig.3.5) [1].

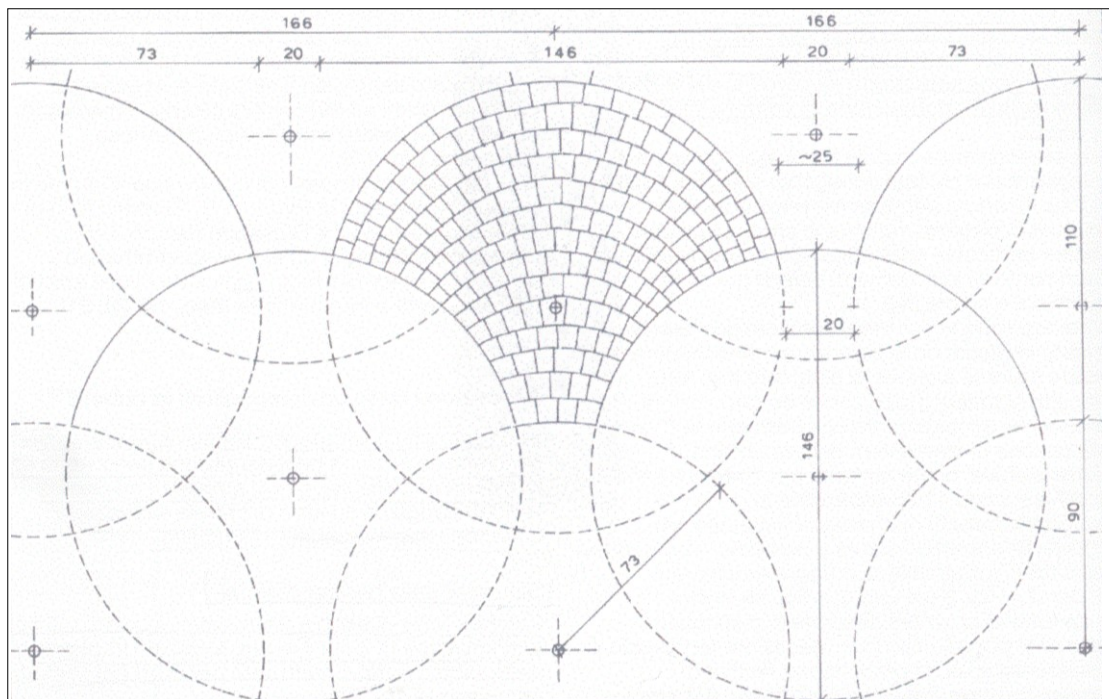
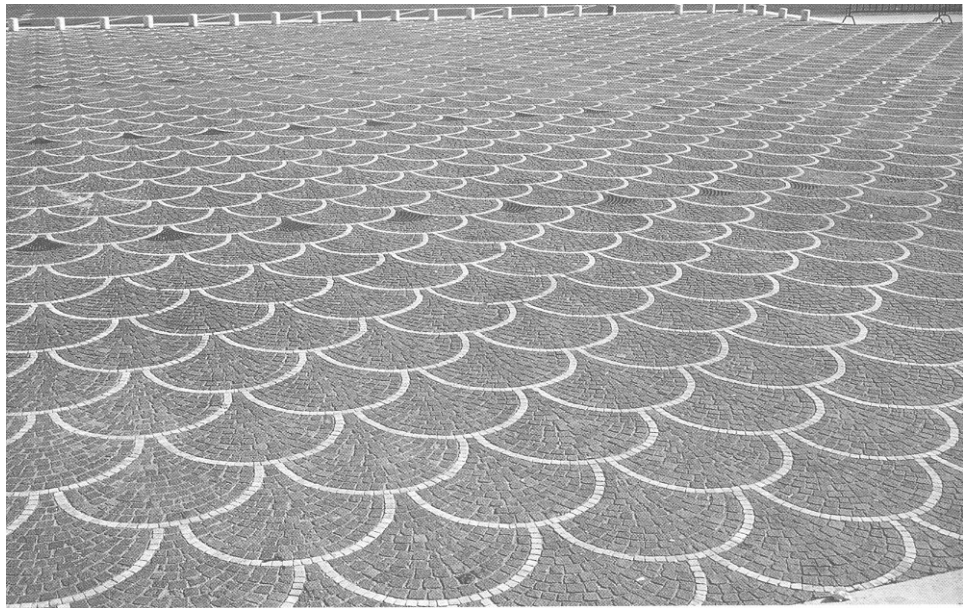


**Fig. 3.5-**Apparecchiatura a redans per pavimentazioni in selciato.

Un'altra apparecchiatura di più elevato pregio è quella a coda di pavone che si ottiene disponendo i cubetti in modo da avere semicirconferenze contigue ed impostando settori successivi sulla mezzeria delle semicirconferenze già disposte (Fig.3.6).

Con questa apparecchiatura, in genere adottata per aree pedonali, è preferibile impiegare cubetti del tipo 4/6 o 6/8.

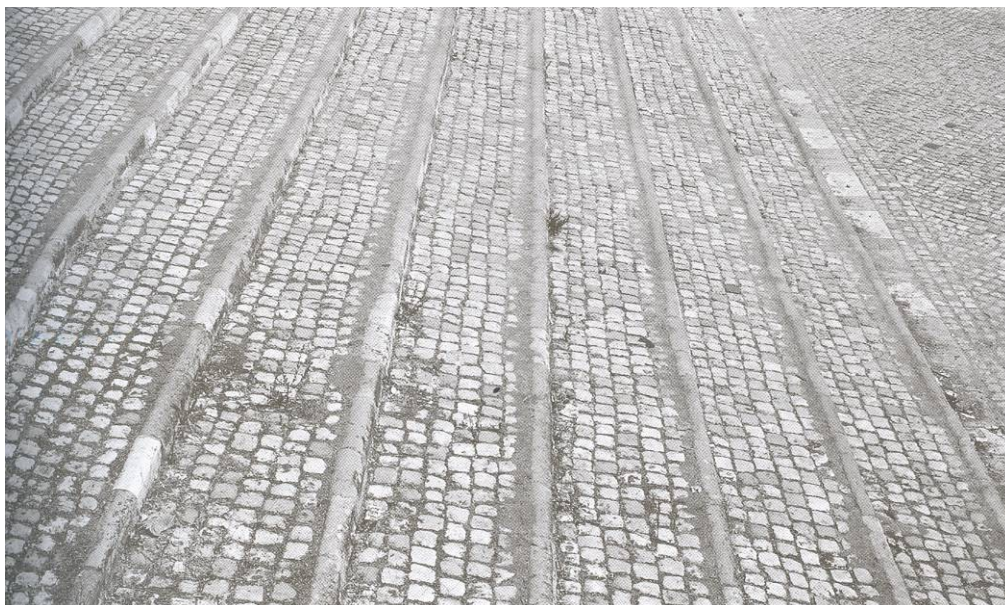




**Fig. 3.6-**Apparecchiatura a coda di pavone per pavimentazione in selciato.

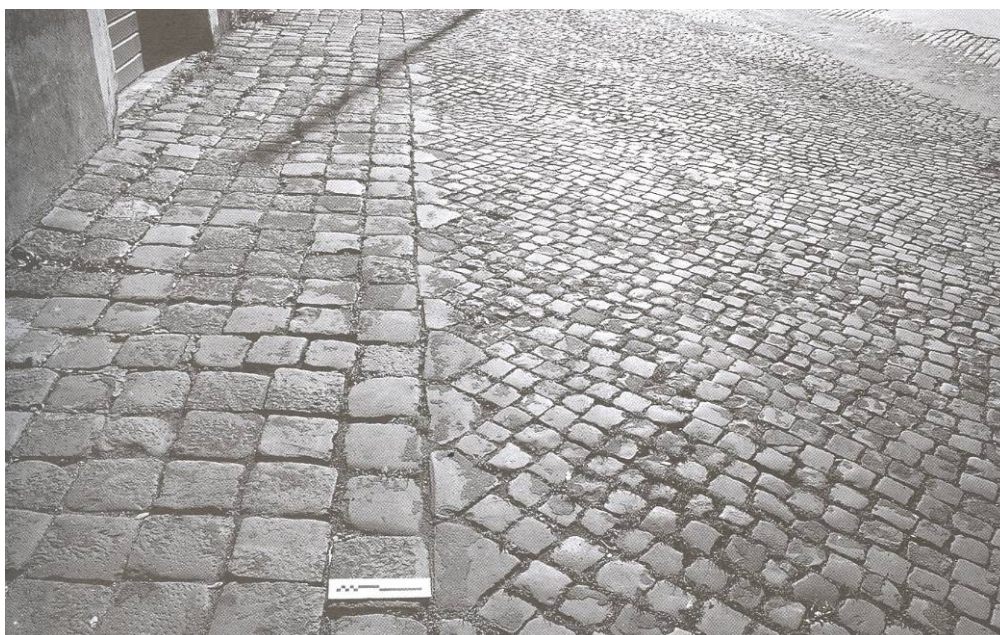
E' possibile effettuare la posa dei cubetti anche a corsi rettilinei, o a spina di pesce, ma in tal caso è indispensabile selezionare cubetti abbastanza uniformi per ogni singolo corso, in modo da non creare delle fughe troppo difformi tra di loro con effetto antiestetico (Fig.3.7) [1].





**Fig. 3.7** - Selciato a corsi rettilinei ed elementi sfalsati.

A Roma è molto impiegata la disposizione dei cubetti a corsi rettilinei con una tessitura direzionata secondo un'inclinazione a  $45^\circ$  rispetto all'asse stradale (Fig.3.8) [1].



**Fig. 3.8** - Apparecchiatura a corsi rettilinei per pavimentazioni in selciato. Via dei Cerchi a Roma.

Anche tale disposizione risponde, seppur con minor efficacia, a contrastare le spinte, trasmettendole verso i margini della strada.

A suo vantaggio è la possibilità di invertire il flusso di traffico lasciando inalterata la sua resistenza.

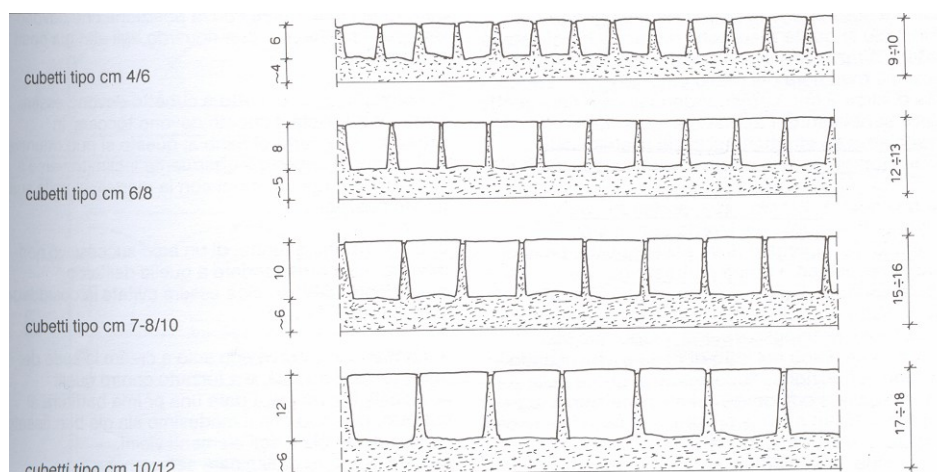
Infatti, gli archi contrastanti svolgono efficacemente la loro funzione soprattutto se percorsi dal flusso di traffico nella direzione chiave di volta-centro dell'arco.

### **Esecuzione pavimentazioni in cubetti.**

Il sottofondo può essere costituito da una massicciata (con ghiaia e sabbia compattata) oppure da una gettata di calcestruzzo.

La pavimentazione consiste in un rivestimento della superficie stradale con cubetti lapidei, poggiati su un letto di sabbia e disposti secondo l'apparecchiatura richiesta.

Poiché il letto di sabbia deve avere, a lavoro ultimato, uno spessore di circa 4-6 cm, lo spazio occupato dalla sabbia e dai cubetti sarà per i vari tipi così come segue.



**Fig. 3.9.-** Spessori delle pavimentazioni in selciato compressive dello strato di sabbia.

Quindi se la strada deve rispettare una certa quota fissa il sottofondo dovrà adattarsi a tali altezze.

Una volta definito ciò bisogna fissare il numero e la larghezza degli archi, per fare ciò bisogna seguire delle regole pratiche: Ai lati della strada devono essere previsti due mezzi archi. Per le strade a sezione trasversale convessa (schiena d'asino), il numero degli archi deve essere sempre pari: in tal modo al centro della strada medesima si viene a disporre un arco intero. Se al contrario gli archi fossero dispari, si avrebbe al centro una linea formata da dall'incrocio di due archi, soluzione sconsigliabile sia esteticamente, sia per ragioni legate alla resistenza, sia per una maggiore difficoltà del posatore.

---

Se la larghezza della strada non è divisibile per il numero pari degli archi, si può disporre ai lati della strada uno o due file di cubetti, posati ortogonalmente e con dimensioni pressoché uguali o maggiori che si chiamano guide.

Inoltre bisogna prevedere come nella realizzazione di qualsiasi pavimentazione stradale, una pendenza trasversale necessaria a convogliare le acque meteoriche di circa 1 - 2%.

Successivamente si inizia la stesa della sabbia, formando uno strato di altezza di circa 6 o 7 cm.

La sabbia da impiegare deve essere pulita, priva di materie terrose ed a grana piuttosto grossa.

Sabbie sporche di terra devono essere scartate, perché sotto l'azione dell'acqua la terra, mescolata nella sabbia si scioglie e viene trasportata via, causando dei vuoti nel letto di posa e provocando in tal modo la riduzione irregolare delle quote della pavimentazione con conseguenti avvallamenti ed irregolarità. Oltre a ciò la presenza di terra favorisce il crescere di erba tra le fughe.

Sullo strato di sabbia così predisposto ed in base alla suddivisione degli archi, viene iniziato il collocamento dei cubetti.

Le norme da eseguire per la buona riuscita della pavimentazione sono:

I cubetti più piccoli devono essere collocati agli incroci degli archi (imposta), mentre i più grandi troveranno posto al centro (chiave). Il posatore deve selezionare il materiale da posare in opera e scartare eventuali elementi danneggiati.

Le giunture tra cubetto e cubetto devono essere strette e parallele. I cubetti devono toccarsi in prossimità del letto di sabbia; questo si può ottenere collocando il cubetto leggermente inclinato verso il posatore e forzandolo poi con la martellina nella giusta posizione.

Le giunzioni, o fughe, di un arco successivo non devono mai corrispondere a quelle dell'arco precedente.

La martellina serve non solo a creare la sede del cubetto nella sabbia, ma anche per dare una battitura preliminare al cubetto, in modo che la superficie pavimentata si presenti regolare e con le pendenze desiderate ancor prima della battitura.

La posa dei cubetti deve essere sempre iniziata nel punto più basso della strada. Gli archi devono avere la convessità rivolta verso l'alto. Con questo sistema si evita che l'acqua della successiva battitura venga a bagnare lo spazio dove si esegue la prova.

Ultimata l'operazione di posa si inizia quella di battitura, che viene effettuata tramite piatti vibratorii meccanici, azionati da motore.

---

La prima operazione consiste in un'abbondante insabbiatura della superficie ed una sua seguente asportazione mediante scope, in modo da riempire tutti gli interstizi tra cubetto e cubetto.

Si aziona quindi la macchina e, mentre un posatore dirige la medesima accompagnandola per file dritte, l'altro posatore precede la macchina con il tubo dell'acqua, bagnando la pavimentazione e provvedendo con il getto a far penetrare la sabbia nelle fughe e ad asportare l'eccedenza.

Il complesso di una pavimentazione è ben eseguito quando negli spazi vuoti la sabbia ha raggiunto il massimo grado di costipazione.

L'ultima operazione che viene eseguita è la sigillatura.

Essa consiste nel chiudere nella parte superficiale, con un materiale legante e possibilmente impermeabile, le fughe esistenti tra cubetto e cubetto.

La sigillatura garantisce l'impermeabilità della pavimentazione, evitando l'infiltrazione dell'acqua ed i conseguenti pericoli del gelo nonché l'asporto della sabbia dovuto alle piogge ed i conseguenti disfacimenti del manto.

Inoltre la sigillatura protegge gli spigoli dei cubetti, evitando il cosiddetto acciottolamento, cioè l'arrotondamento dei medesimi.

Generalmente la sigillatura viene effettuata con mastice di bitume a caldo o a freddo. La prima soluzione consiste nel versare del mastice bituminoso, preventivamente riscaldato in caldaia, sulla pavimentazione battuta.

L'operazione viene eseguita per ogni singolo elemento, cioè seguendo tutte le fughe dei cubetti, servendosi di una particolare tazza a beccuccio o di imbuto appositamente predisposto. Si procede quindi alla stesa di un velo di sabbia sulla superficie.

Tale tipo di sigillatura non è attualmente più impiegata a causa dell'elevato costo del bitume della sua posa in opera, e dei danni provocati dalle inevitabili sbavature sulla superficie.

La seconda soluzione, anch'essa scarsamente impiegata seppur meno costosa e di più semplice esecuzione rispetto alla prima, consiste nello stendere a freddo sulla pavimentazione una emulsione bituminosa, facendola penetrare nelle giunture con l'ausilio di spazzolini.

Si procede quindi alla pulitura, prima con sabbia e poi con segatura. Attualmente invece sono state sperimentati materiali più innovativi per la sigillatura dei giunti, in particolare sono stati fatti degli studi sulle "resine poliuretaniche" di cui si parlerà ampiamente più avanti.

---

Un altro tipo di sigillatura, che viene utilizzato generalmente quando la pavimentazione è destinata ad uso pedonale, è quella con boiaccia cementizia.

Tale sigillatura si prepara miscelando in parti uguali sabbia (a grana fine ed uniforme), acqua e cemento.

Questo materiale viene steso sulla pavimentazione servendosi di spazzolini, cercando di far penetrare completamente il medesimo in ogni giuntura.

Si lascia riposare tale boiaccia per una o due ore, in modo che la stessa abbia iniziato il processo di presa e con un getto d'acqua a pioggia si dovrà asportare la parte più evidente che ricopre la pavimentazione; ciò si esegue sempre con l'ausilio degli spazzolini rigidi sopra menzionati.

Per avere un risultato soddisfacente è fondamentale procedere a cospargere la superficie con segatura di legno bagnata, tirandola con le spazzole.

Tale operazione deve essere ripetuta con segatura asciutta fino alla completa pulizia della superficie.

Una particolare attenzione deve essere posta nella pulitura accurata di tutti gli scarichi, caditoie e pozzetti, in modo che la boiaccia depositata in essi non si solidifichi ostruendoli [1].

### **Prove sui Materiali**

Le prove da eseguire sugli elementi squadrate piccoli sono riportate nelle norme C.N.R. (fascicolo 5/1954) e sono di seguito elencate.

- Resistenza alla compressione (fascicolo 4/1953): viene valutata su provini cubici aventi il lato preferibilmente maggiore di 7cm.
- Gelività su materiale lapideo squadrato (fascicolo 4/1953): è intesa la resistenza all'azione disgregatrice causata dal gelarsi dell'acqua contenuta nei pori. La prova consiste nel sottoporre preventivamente dei provini cubici a 20 cicli alternati di temperatura (fra -10°C e + 35°C) e quindi nel misurare la resistenza a compressione e l'eventuale perdita di peso per sfaldamento superficiale; il materiale è ritenuto non gelivo se la variazione della resistenza a compressione è inferiore al 25% e l'eventuale perdita di peso è inferiore al 2%.
- Resistenza all'usura di blocchi lapidei con "tribometro" (fascicolo 4/1953): è misurata come diminuzione di spessore del provino prismatico la cui base quadrata viene tenuta compressa su di un disco metallico rotante (l'usura è facilitata dall'aggiunta di polvere abrasiva); la resistenza all'usura è espressa



---

come rapporto tra la diminuzione di spessore di un campione di granito di S. Fedelino e quella riscontrata.

- Resistenza all'urto (fascicolo 5/1954): è il numero di colpi esercitati da una massa battente necessario a produrre la rottura di provini cubici collocati su un supporto rigido.

### **Inserzioni tranviarie.**

Nelle pavimentazioni a selciato è possibile inserire linee tranviarie purché si adotti l'armamento rigido, oppure quello elastico eseguito con particolari modalità.

L'armamento elastico costituito da traversine poggiate su massicciata, rappresenta il caso più frequente.

In presenza di tale armamento si possono avere due inconvenienti uno relativo al cedimento generale dei binari l'altro relativo all'ondularsi della pavimentazione tra le rotaie a causa del diverso cedimento delle traversine e dell'inghiaiaata comprese tra le traversine medesime. Il primo inconveniente si può risolvere collocandosi una robusta fondazione in pietrisco a forte pezzatura e tenendo le quote del binario leggermente sopraelevate su quelle della normale sagoma stradale.

Il secondo inconveniente si può superare mescolando sabbia al pietrisco della massicciata, costipando energicamente la miscela dei due materiali fra le traversine, al fine di uniformare il piano di posa dei cubetti e impedire al letto di sabbia di disperdersi. Inoltre ai due lati dei binari è preferibile disporre elementi di dimensioni superiori ai cubetti.

Tuttavia a causa delle forti sollecitazioni trasmesse alla pavimentazione dalle pesanti vetture tranviarie è preferibile l'impiego di lastricati in grado di resistere in misura ben più maggiore rispetto ai selciati [1].



**Fig. 3.10** - Inserzione tranviaria in una pavimentazione in selciato

---

### **Pavè.**

Un tipo di selciato che impiega elementi giganti è il pavè molto diffuso nel nord Europa, soprattutto in Francia, ma quasi assente in Italia .

Gli elementi sono prodotti in varie dimensioni, ma quelle più impiegati presentano la faccia in vista quadrata con lato di circa 14 cm ed altezza di circa 20 cm.

Piuttosto diffusa è anche la forma rettangolare con apparecchiatura a corsi paralleli e giunti sfalsati.

Questo tipo di pavimentazione presenta una superficie particolarmente scabra ed è quindi molto adatto nei rivestimenti di percorsi carrabili con forte pendenza localizzate in zone con clima umido e presenza di frequenti gelate.



**Fig. 3.11.** – Pavimentazione in pavè con apparecchiatura a corsi paralleli e giunti sfalsati.

### **Pavimentazioni con smolleri.**

E' un tipo di pavimentazione caratterizzato da una elevata scabrosità, pertanto sono particolarmente indicati nei percorsi stradali e nelle rampe con forte pendenza, soprattutto in zone montane dove è più frequente la presenza di neve e gelo.

Gli smolleri presentano uno spessore di 3-10 cm, con larghezza 8-13 cm e lunghezza a correre, pertanto risultano molto più sottili degli elementi usati per la realizzazione del pavè [1].

### **Intersezioni tranviarie.**

In presenza di armamento nella sede stradale il miglior rivestimento è rappresentato dal lastricato.

Poiché la rotaia ha una particolare sagoma che non aderisce ai fianchi degli elementi del lastricato che sono piani, si pongono in opera tra massello e rotaia dei laterizi forati che



---

si fanno aderire verticalmente con malta alla rotaia con una faccia, mentre all'altra si affianca il massello.

La parte superiore della rotaia deve essere sempre tenuta più alta di 0,5 cm rispetto alla superficie del lastricato, perché con il passaggio delle vetture la rotaia tende ad abbassarsi per l'assestamento del sottofondo [1].

### **3.2.3 IL LASTRICATO**

E' la più antica delle pavimentazioni e la più diffusa nei centri urbani, sia per la sua durata, sia per la scarsa manutenzione che richiede, sia per l'alto pregio estetico che è possibile conseguire anche mediante l'accostamento di elementi realizzati con litotipi diversi. Naturalmente uno degli aspetti principali è rappresentato dalla durezza estrinseca della roccia impiegata, ovvero dalla sua capacità di resistere alle azioni meccaniche, fisiche, chimiche e organiche (microrganismi).

Come è noto una maggiore durezza caratterizza le rocce eruttive, a decrescere, quelle calcaree e le arenare (queste ultime anche gelive).

Per quanto riguarda la resistenza all'usura le rocce più adatte sono quelle la cui superficie tende a mantenersi scabra nonostante l'azione di usura.

Ovviamente la selezione delle rocce da impiegare è connessa non solo ai fattori di resistenza, ma anche a quelle ambientali, estetici e quindi progettuali.

Per tanto è opportuno, quando ciò è possibile, tenere presente l'impiego delle pietre locali anche in considerazione di una loro costante disponibilità e di un loro eventuale costo contenuto.

Attualmente gli elementi più impiegati nei lastricati consistono in lastre quadrangolari (sia rettangolari che quadrate) prodotte in varie dimensioni.

Ciò in funzione sia dell'uso, sia delle esigenze, sia del tipo di roccia impiegata.

In genere le lastre rettangolari presentano una lunghezza pari a 1,5 volte (e fino a 2 volte) la larghezza e possono raggiungere anche dimensioni superiori al metro.

Gli spessori variano da alcuni centimetri ai 20 centimetri (e oltre) in relazione alla resistenza, alla lavorabilità della roccia impiegata e alla natura ed intensità del traffico previsto.

Naturalmente le lastre di grandi dimensioni vengono soprattutto impiegate in pavimentazioni pedonali, essendo meno resistenti di quelle più piccole.

---

La lavorazione della superficie di marcia varia a seconda delle sollecitazioni alle quali sarà sottoposta la pavimentazione.



**Fig. 3.12.** Lastricato in Vesuvite.



**Fig. 3.13.-**Lastricato in lava leucitica.

Pertanto, mentre nei percorsi pedonali o in quelli di modesta carrabilità si ricorre a superfici scalpellate o bocciardate fini, si giunge attraverso gradi intermedi all'esecuzione di scanalature a sezione triangolare ( con profondità anche maggiore di 10 mm) sul lastre destinate a rampe carrabili caratterizzate da forte pendenze. Tali scanalature vengono generalmente eseguite con andamento diagonale secondo il senso di marcia, per permettere una maggiore aderenza alle ruote dei veicoli.

---

In genere si ricorre ai seguenti tipi di lavorazione:

- a punta grossa, i solchi dello scalpello, uniformemente distribuiti, devono avere una profondità di 8-12 mm;
- a punta mezzana, profondità dei solchi 5-8 mm;
- a punta fina, profondità dei solchi 2-5 mm.

La manutenzione ordinaria dei lastricati consiste principalmente nel restaurare tali lavorazioni delle superfici usurate dalle precipitazioni.

### **Modalità di esecuzione dei lastricati.**

Gli attuali sottofondi sono in genere realizzati in pietrisco costipato con cilindratura che viene ripetuta fino ad ottenere una superficie piana e compatta.

Viene anche impiegato il calcestruzzo a volte armato, quando si prevedono sollecitazioni particolari.

Nel caso del calcestruzzo è bene rammentare che i sottofondi monolitici così realizzati sono soggetti a dilatazioni termiche che impongono la previsione dei necessari giunti di dilatazione.

Ovviamente tali giunti dovranno essere previsti anche nel manto di rivestimento, al fine di evitare sollecitazioni che, con il tempo, possono determinare anche gravi danni alla pavimentazione specialmente se di superficie estesa.

Il letto di posa può essere costituita come nel caso dei selciati, da uno strato di sabbia, oppure da uno di malta, o legante aereo, o idraulico.

Nel primo caso lo spessore della sabbia generalmente non supera i 10 cm e la sua granulometria deve essere grossa e bene assortita.

Gli elementi vengono disposti ben accostati anche intervenendo con lo scalpello per adattare i lati e gli spigoli di combaciamento.

La pavimentazione viene quindi bagnata in modo da permettere alla sabbia fluidificata di penetrare agevolmente negli interstizi e nei vuoti sottostanti; in questo caso l'operazione viene favorita da un'apposita battitura degli elementi, eseguita mediante mazzeranghe o con piatti vibratori meccanici, avendo cura in ogni caso, di non lesionare o fratturare gli elementi.

---

A posa avvenuta è opportuno intervenire con scalpellature al fine di rettificare le eventuali differenze di quota dovute ad un possibile affondamento differenziato delle lastre nel letto di sabbia.

La posa su letto di malta viene eseguita in genere nei casi in cui la pavimentazione è interessata da terreni argillosi, limosi, o comunque poco costipabili, ovvero in tutti quei casi nei quali occorre compensare l'irregolarità altimetrica dell'area di posa determinata dalla natura del terreno [1].

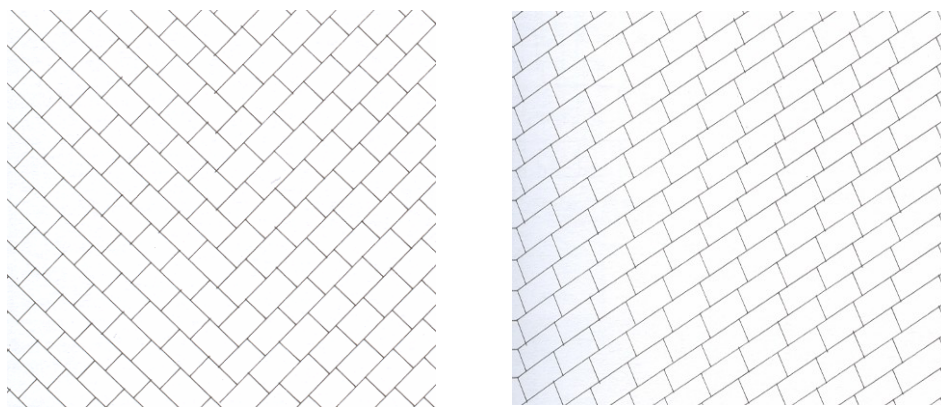
In Italia questo metodo è molto impiegato nel Veneto, in Toscana ed in buona parte del Meridione.

### **L'apparecchiatura**

Nel passato l'apparecchiatura maggiormente impiegata per la pavimentazione dei percorsi carrabili è stata quella a corsi inclinati rispetto all'asse stradale.

Tale disposizione delle lastre si rendeva necessaria al fine di evitare che le ruote ferrate percorressero le direzioni dei giunti (o fughe) che, in ogni caso, rappresentano sempre le parti più deboli ed esposte del manto stradale.

Rispetto all'asse stradale le inclinazioni dei corsi più adatte e più impiegate sono quelle a  $45^\circ$  oppure a  $27^\circ$ , [1].



**Fig. 3.14** - Pavimentazioni in lastricato con apparecchiatura a corsi inclinati rispetto all'asse stradale. a) Corsi inclinati di  $45^\circ$ ; b) Corsi inclinati di  $27^\circ$ .

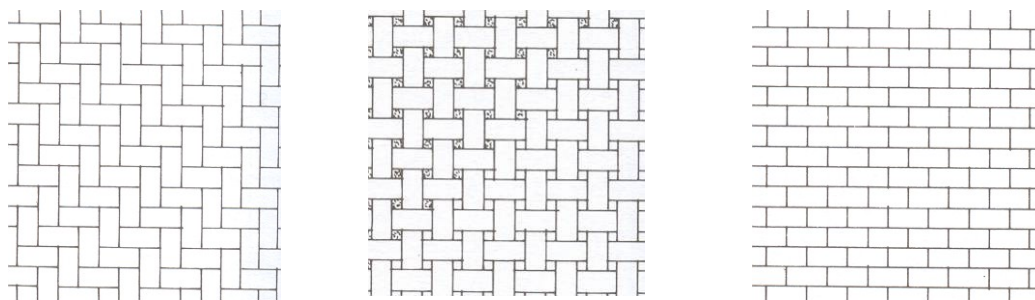
Attualmente con l'impiego da parte dei veicoli di ruote gommate, larghe ed elastiche, il problema dei giunti inclinati è venuto meno e, pertanto, si ricorre quasi sempre ad apparecchiature con giunti paralleli rispetto all'asse stradale.

Queste apparecchiature permettono realizzazioni veloci ed economiche, anche in considerazione dell'assenza di tagli obliqui alle lastre finali in corrispondenza dei margini della pavimentazione.

---

L'apparecchiatura con corsi longitudinali è nella tradizione dei marciapiedi e dei percorsi pedonali in genere, mentre quella a spina di pesce è impiegata in particolare per ampie superfici come le piazze (carrabili o meno), o può derivare dall'incrocio di percorsi con apparecchiatura obliqua [1].

I lastricati possono impiegare elementi di varia dimensione.



**Fig. 3.15** - Apparecchiatura: a) a “spina di pesce”; b) a “intreccio”; c) a “corsi paralleli” con giunti sfalsati.

E' da tener presente che pavimentazioni realizzati con elementi medi e piccoli sono caratterizzate da una maggiore resistenza e da una posa molto più agevole in considerazione e il minor peso dei singoli elementi.

Per questo, in generale, il selciato presenta una più rapida posa in opera ed una maggiore resistenza rispetto ai lastricati realizzati con elementi di dimensioni elevati.

A favore del lastricato sono non solo una maggiore durata ed una minore manutenzione ma soprattutto il grande pregio estetico[1].

### **3.2.4 MASSELLI AUTOBLOCCANTI IN CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA.**

Questo tipo di pavimentazioni sono comparse in Italia agli inizi degli anni Ottanta e la loro diffusione ha riguardato soprattutto l'impiego in opere pubbliche (il 60%, seguito dal porfido).

Il motivo di questa grande diffusione è da ricercare nei costi contenuti, nell'elevata resistenza agli agenti esterni, nella semplice posa in opera e nella grande varietà di forme e colori a disposizione. La plasticità del calcestruzzo fresco permette di creare superfici composte da elementi di qualsiasi forma spaziale, con rientranze, protuberanze, cavità, rilievi, rotondità, ecc [2].

---

La duttilità cromatica, che deriva dalla possibilità di aggiunta di vari materiali alla miscela, consente di ottenere superfici stradali praticamente di ogni colore: il cemento bianco o grigio, miscelato con gli elementi più fini della sabbia, determina la colorazione di base del calcestruzzo; gli aggregati di dimensioni maggiori definiscono invece la colorazione della superficie in tutte quelle pavimentazioni in cui vengono eseguiti dei trattamenti con eliminazione della malta più superficiale.

La colorazione di base può inoltre essere modificata con l'aggiunta di coloranti, siano essi ossidi di metallo o pigmenti sintetici.

Esiste infine un'ampia varietà di tessiture del calcestruzzo: da quelle più lisce (trattamento con tela di iuta) a quelle più rugose (superfici lavate, denudate, bocciardate, martellate, stampate, ecc.).

Le combinazioni di forma, colore e tessitura sono quindi innumerevoli riuscendo praticamente ad imitare qualunque pietra naturale ed avendo il vantaggio tecnico di poter produrre superfici anche di forma molto complessa e di qualunque dimensione, ad un costo generalmente inferiore di quello della pietra naturale.

Inoltre è da considerare la semplicità di rimozione e di riutilizzo degli elementi nel caso d'interventi nel sottosuolo e l'immediata messa in servizio della pavimentazione a fine lavoro.

Il sistema autobloccante viene raggiunto mediante la particolare forma dei masselli e il tipo di geometria di posa adottato. Ovviamente forme geometriche diverse producono gradi diversi di vincolo, [2] [3].

Inoltre la geometria di posa riveste particolare importanza nel sistema autobloccante, in quanto anche masselli di forma meno opportuna se posati secondo le disposizioni consigliate dalle aziende produttrici, possono raggiungere l'effetto desiderato.

Solitamente la geometria di posa consigliata è quella a "spina di pesce".

In generale la capacità autobloccante è direttamente proporzionale allo spessore del massello ed inversamente proporzionale alla sua superficie.

Per questo è necessario operare scelte progettuali in funzione del tipo di traffico al quale si prevede sarà sottoposta la pavimentazione.

Quindi occorre selezionare il tipo di massello in relazione alla sua forma, al suo spessore, alla geometria di posa degli elementi ed alla direzione della tessitura.

Solo in questo modo si garantisce il trasferimento ai masselli limitrofi delle sollecitazioni provocate dal passaggio dei corpi in movimento.

---

Ad alcune forme di massello corrispondono particolari caratteristiche di resistenza. Per esempio, il tipo a doppio T è indicato per pavimentazioni sottoposte a traffico veicolare pesante, [2] [3].

Mentre il grigliato, con i fori riempiti di terra dopo la posa, è spesso impiegato per aree destinate a parcheggio o comunque in tutte quei casi dove occorre consentire all'acqua di filtrare nel terreno sottostante, evitando ristagni e permettendo un'agevole percorrenza dei veicoli.

Appare inoltre evidente che il sistema autobloccante affida la sua efficacia all'attrito prodotto tra le superfici verticali di contatto tra i masselli.

Risulta quindi molto importante che i masselli vengono prodotti industrialmente con caratteristiche costanti di dimensioni e forme.

Bisogna tener presente che esistono vari tipi di masselli [4]:

- i masselli semplici, sono prodotti attraverso la vibrocompressione di un blocco unico di calcestruzzo con eventuale aggiunta di pigmenti colorati nell'impasto;
- i masselli con riporto, sono prodotti con uno strato di finitura al quarzo che consente una maggiore uniformità di superficie ed una sua maggiore resistenza. Tale strato, di 5-8mm, deve costituire corpo unico con lo strato inferiore;
- i masselli multistrato, sono costituiti da uno strato inferiore (o portante) in conglomerato cementizio con inerti di fiume di varia granulometria e di uno strato superiore (o di usura) di cemento Portland 425 con inerti di quarzo e granulometria più fine dei precedenti, coloranti ed additivi. Una doppia vibrocompattazione assicura l'ancoraggio tra lo strato portante e quello di usura. I masselli di questo tipo presentano una maggiore resistenza alla compressione ed alla flessione, nonché un comportamento più elastico ed una maggiore aderenza al letto di sabbia inferiore dovuto alla presenza nella superficie inferiore degli inerti di fiume.

#### **Modalità di esecuzione.**

Il sottofondo deve essere solido e stabile, formato da una massicciata compatta e stabilizzata di spessore variabile dai 20 ai 60 cm a secondo dell'uso a cui è destinata la pavimentazione e dalla natura del terreno.

Il piano di posa deve essere preparato con uno strato di 4-5 cm di sabbia, prevedendo una opportuna pendenza della pavimentazione per lo smaltimento dell'acqua

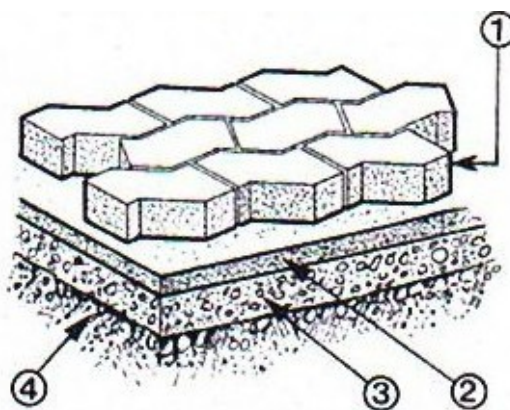
superficiale e verificando livelli considerato il fatto che dopo l'operazione di battitura ci sarà un abbassamento di circa 2 cm.

La posa in opera deve avvenire all'interno di una superficie delimitata da miri o elementi permanenti.

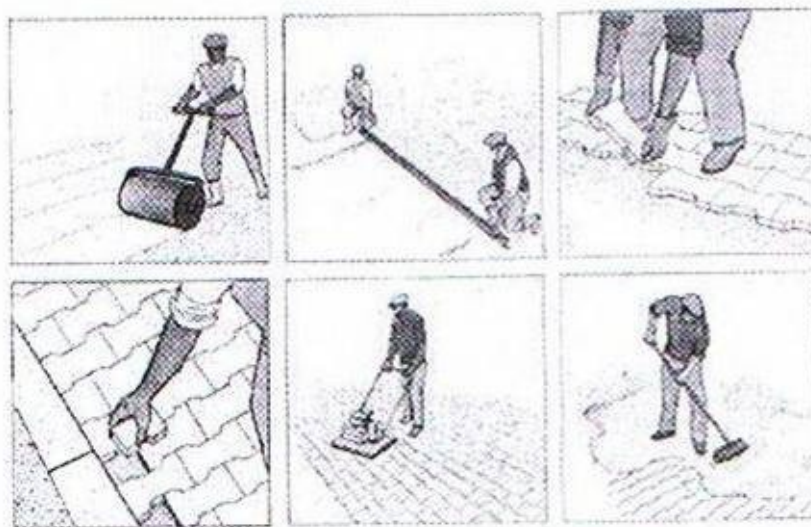
Si deve sviluppare il mosaico con la posa a secco dei masselli, il cui incastro reciproco impedisce loro di spostarsi, consentendo invece la ripartizione dei carichi sui blocchi vicini. Il posatore dovrà lavorare avanzando sulla superficie da lui stesso già realizzata.

La vibrazione dei masselli può essere effettuata mediante vibratore piano o mediante mezzi manuali se le superfici sono limitate.

I giunti di 2-3mm tra un massello e l'altro devono essere successivamente riempiti con sabbia fine applicata mediante spazzolatura [1].



**Fig. 3.16** - Schema di posa delle pavimentazioni ad elementi: 1. rivestimento; 2. letto di posa in sabbia; 3. sottofondo; 4. terreno di fondazione [2].



**Fig. 3.17** - Fasi della posa in opera degli elementi [2]



---

### 3.2.4.1 LE ESPERIENZE STRANIERE

Da molti anni il calcestruzzo è un materiale molto diffuso in Europa nella viabilità urbana.

Il calcestruzzo viene utilizzato sia per pavimentare intere strade, sia per realizzare superfici di estensione limitata che debbano differenziarsi in maniera molto evidente dal resto della pavimentazione, ovvero attraversamenti pedonali rialzati, rotatorie urbane con scopi di traffic calming, dossi, cuscini berlinesi, ecc [4].

Per quel che riguarda le rotatorie, le loro pavimentazioni sono soggette a sollecitazioni considerevoli dovute sia agli sforzi tangenziali originati dalla forza centrifuga sia al sovraccarico sulla ruota esterna conseguenza del movimento laterale dei veicoli.

Le pavimentazioni in calcestruzzo risultano pertanto particolarmente idonee ad essere impiegate in zone urbane con traffico pesante (autobus). In quest'ultimo caso si trovano anche esempi di applicazione di pavimentazione in calcestruzzo ad armatura continua.

La tipologia di pavimentazione in calcestruzzo maggiormente diffusa è comunque quella delle lastre non armate finite con tre tecniche differenti [3]:

- il denudage
- il calcestruzzo martellato
- il calcestruzzo stampato

Il denudage consiste nell'eliminazione della malta superficiale del calcestruzzo per rendere visibile l'aggregato. Con tale procedimento, subito dopo la messa in opera, si spolverizza sulla superficie del calcestruzzo un prodotto che ritarda la presa della malta superficiale e, dopo un intervallo di tempo (variabile fra 4 e 24 ore in funzione delle condizioni atmosferiche presenti), la superficie viene lavata con un getto d'acqua ad alta pressione in modo da eliminare la malta di cemento rimasta in superficie e mettere a nudo l'aggregato [3].

A seconda del dosaggio dell'agente ritardante, l'azione del lavaggio fornisce una tessitura più o meno profonda in modo da dare alla superficie le caratteristiche di aderenza e di aspetto formale desiderate.

Tale tecnica, dagli anni '80 in poi, è stata applicata molto diffusamente in Francia. Pregevoli esempi sono realizzati nella città di Saint Etienne, Mrsiglia e in molti centri minori.

La tecnica del calcestruzzo martellato consiste nell'attaccare la superficie del calcestruzzo indurito con un martello pneumatico fino ad ottenere un aspetto molto

---

simile al granito e dare alla superficie particolari caratteristiche di aderenza. Il tempo minimo per l'indurimento necessario per poter eseguire il martellamento è di 7 giorni. L'operazione viene eseguita con un apparecchio pneumatico composto da teste di acciaio ad elevata durezza o di tungsteno dotate di piccole punte che, battendo sulla superficie, lesionano la malta superficiale e fratturano leggermente l'aggregato.

La martellatura viene fatta con passaggi in senso trasversale fino ad ottenere l'aspetto desiderato [3].

Il calcestruzzo stampato viene eseguito con speciali matrici e forme per la creazione di disegni sul calcestruzzo fresco. Le forme vengono posizionate l'una a fianco dell'altra seguendo il disegno stabilito. Su di esse viene quindi esercitata una leggera pressione e poi vengono gradualmente rimosse lasciando sulla superficie il disegno voluto.

Tale tecnica è stata usata in molte città francesi soprattutto per la riqualificazione dei centri storici.

Un discorso a parte meritano le pavimentazioni in calcestruzzo poroso.

Tale materiale, che unisce in sé buone caratteristiche di aderenza, regolarità e fonoassorbenza, è caratterizzato da una curva granulometrica discontinua e da un alto grado di porosità (20-25%). Il calcestruzzo poroso possiede anche ottime qualità drenanti, diminuendo, di conseguenza, i fenomeni di idroportanza in maniera sensibile. Il calcestruzzo poroso ha conosciuto un'estesa applicazione soprattutto in Francia, sia negli strati di fondazione che in quelli superficiali e, in quest'ultimo caso, sia in spessori sottili (50-60 mm) come rinforzo aderente di vecchie pavimentazioni, sia in spessori più elevati [3] [4].

### **3.2.4.2 LE ESPERIENZE ITALIANE**

Fino alla II guerra mondiale in Italia c'era un gran numero di pavimentazioni in calcestruzzo per tutti i tipi di strada, ma dopo esse si sono ridotte fino quasi ad annullarsi, forse per le particolari condizioni economiche e sociali che vennero a crearsi. Nella seconda metà degli anni '80 rinasce un certo interesse nel calcestruzzo che però si esprime esclusivamente con pavimentazioni in masselli autobloccanti [3] [4].

Nel 1998 il Comitato Tecnico "Pavimentazioni Rigide" dell'AIPCR ha analizzato la situazione corrente delle strade urbane mediante una serie d'indagini presso la maggior parte dei capoluoghi di provincia di tutta Italia.

---

Dai dati raccolti si è dedotto che le pavimentazioni con almeno uno strato in calcestruzzo sono poco usate in ambito urbano [2].

Quelle esistenti possono essere distinte nelle seguenti tipologie:

- A lastre, soltanto in alcune città del Nord Italia. Le lastre sono armate o non, con spessori compresi fra 15 cm e 30 cm e poggiano in genere su uno strato di materiale non legato di 20-35 cm.
- A masselli autobloccanti, maggiormente impiegate rispetto alle precedenti, sono costituite da uno strato in masselli dello spessore di 6-8 cm poggianti su un letto di sabbia di 4-5 cm al di sotto del quale si trova uno strato di misto granulare non legato dello spessore di 20-30 cm e uno strato di materiale più fino utilizzato per conferire regolarità al piano di sottofondo dello spessore di 10-20 cm. Al posto degli ultimi due strati detti è possibile trovare uno strato di misto cementato dello spessore medio dell'ordine di 30 cm oppure uno strato di calcestruzzo armato o non di spessore di 15-20 cm.
- Composite, per le quali, in funzione dello strato superficiale, è possibile distinguere:
  - cubetti di porfido, in genere con spessore di 8-14 cm, posti in opera su di un letto di sabbia con spessore di 8-12 cm, uno strato in calcestruzzo armato o non (15-30 cm) e uno strato in misto granulare non legato;
  - lastricati di basoli in pietrarsa, molto diffusi nel centro sud dell'Italia, in genere alti 16-22 cm su uno strato di malta (spessore medio dell'ordine di 4-5 cm) sovrastante lo strato di calcestruzzo;
  - conglomerato bituminoso di spessore minimo pari a 3 cm su uno strato in calcestruzzo.

I giudizi espressi dagli intervistati sul comportamento nel tempo delle tipologie di pavimentazioni suddette sono stati sostanzialmente positivi.

Solo in qualche caso si sono riscontrati scalinamenti per le pavimentazioni a lastre, difetti di sigillatura ai giunti per le pavimentazioni a masselli e per quelle in cubetti di porfido o in lastricati di basoli, fessure da richiamo in superficie per le pavimentazioni con uno strato di calcestruzzo ricoperto da conglomerato bituminoso.

### 3.2.4.3 METODI DI DIMENSIONAMENTO

In molti paesi sono stati sviluppati manuali, cataloghi e norme per il dimensionamento delle pavimentazioni delle strade urbane.

Per quelle in calcestruzzo in particolare, uno dei paesi più attivi è stata la Francia che ha sviluppato sia abachi di dimensionamento che cataloghi per il dimensionamento degli strati della pavimentazione [4].

Nella tabella 1 è riportato il catalogo della ABCP (Associazione Brasiliana di Cemento Portland) per strade urbane e zone di fermata degli autobus in calcestruzzo. Gli spessori delle lastre in calcestruzzo sono stati determinati secondo il metodo della Portland Cement Association (PCA), in funzione della portanza del sottofondo definita mediante l'indice CBR (variabile fra 3 e 20%).

La resistenza minima a trazione per flessione del calcestruzzo è pari a 4,5 MPa. Sono previste fondazioni in misto granulare, misto cementato o calcestruzzo magro.

Il traffico dei veicoli commerciali è composto principalmente da autobus con carico sull'asse anteriore di 5t e sull'asse posteriore di 10t. Considerando il traffico giornaliero medio per ogni senso di marcia, variabile in funzione del tipo di strada urbana, sono stati presi in considerazione i valori: 50-100-250-500-1000-2000 veicoli al giorno.

La vita utile considerata in progetto è di 25 anni. Viene usato un coefficiente di sicurezza moltiplicatore del carico di 1,2 [4].

TGM per senso di marcia	Tipi e spessori delle fondazioni					
	Misto Granulare 15 cm		Misto cementato 10 cm		Calcestruzzo magro 10 cm	
	CBR%	H (cm)	CBR%	H (cm)	CBR%	H (cm)
50	3	20	3-4	18	3-8	17
	4-7	19	5-15	17	9-20	16
	8-20	18	16-20	16		
100	3-4	20	3-7	18	3-4	18
	5-13	19	8-20	17	5-20	17
	14-20	18				
250	3-4	21	3-5	19	3	19
	5-8	20	6-20	18	4-20	18
	9-20	19				
500	3-4	21	3-4	20	3	20
	5-20	20	5-20	19	4-20	19
1000	3-17	21	3-20	20	3-20	20
	18-20	20				
2000	3-5	22	3-7	21	3-4	21
	6-20	21	8-20	20	5-20	20

**Tabella 2** - Determinazione dello spessore della lastra in calcestruzzo per strade urbane e zone di fermate di autobus.

---

#### 3.2.4.4 I METODI DI COSTRUZIONE

Le pavimentazioni rigide per le aree urbane sono generalmente costituite da lastre non armate in calcestruzzo vibrato o poroso, con o senza barre di compartecipazione ai giunti in funzione del tipo di traffico e dell'entità dei carichi.

Le lastre sono separate tra loro da giunti di contrazione e di costruzione (sia in senso trasversale che longitudinale) e di dilatazione [4].

I giunti di contrazione, necessari per il controllo delle deformazioni e delle tensioni di origine igro-termica, sono realizzati mediante l'esecuzione di un taglio nel calcestruzzo di profondità pari ad  $1/4 - 1/3$  dello spessore della lastra e di larghezza pari a 3-5 mm.

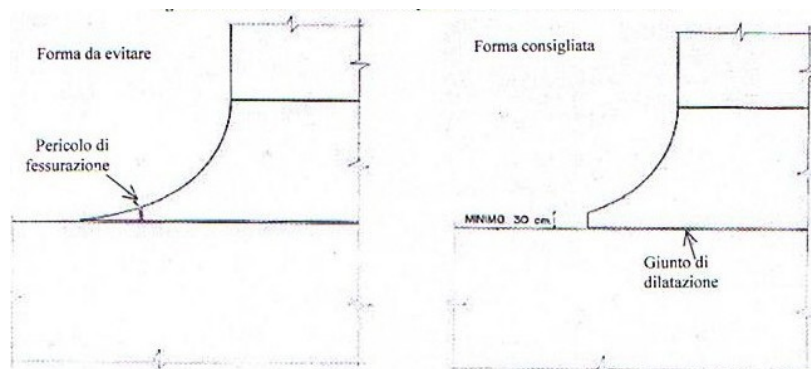
I giunti di costruzione vengono realizzati in seguito a qualunque interruzione del getto superiore a mezz'ora e sono in genere dotati di barre d'acciaio. La distanza tra i giunti trasversali è usualmente compresa fra 4 e 6 m. I giunti longitudinali, paralleli all'asse della strada per il controllo delle deformazioni di origine termica, sono necessari quando la larghezza della pavimentazione è maggiore di 4,50 m.

Infine, nei casi in cui occorre realizzare un'interruzione totale del rivestimento, per esempio nei pressi delle opere d'arte, delle curve a piccolo raggio, ecc., vengono previsti anche i giunti di dilatazione allo scopo di compensare le variazioni dimensionali delle lastre provocate da variazioni di temperatura. Tali giunti, di lunghezza compresa fra 10 e 20 mm, vengono generalmente riempiti di materiale compressibile.

La localizzazione dei giunti delle pavimentazioni in calcestruzzo in area urbana deve essere studiata con particolare attenzione soprattutto nei seguenti casi: piccoli raggi di curvatura (inferiori a 200 mm), presenza di elementi rigidi nella pavimentazione (griglie e pozzetti), incroci.

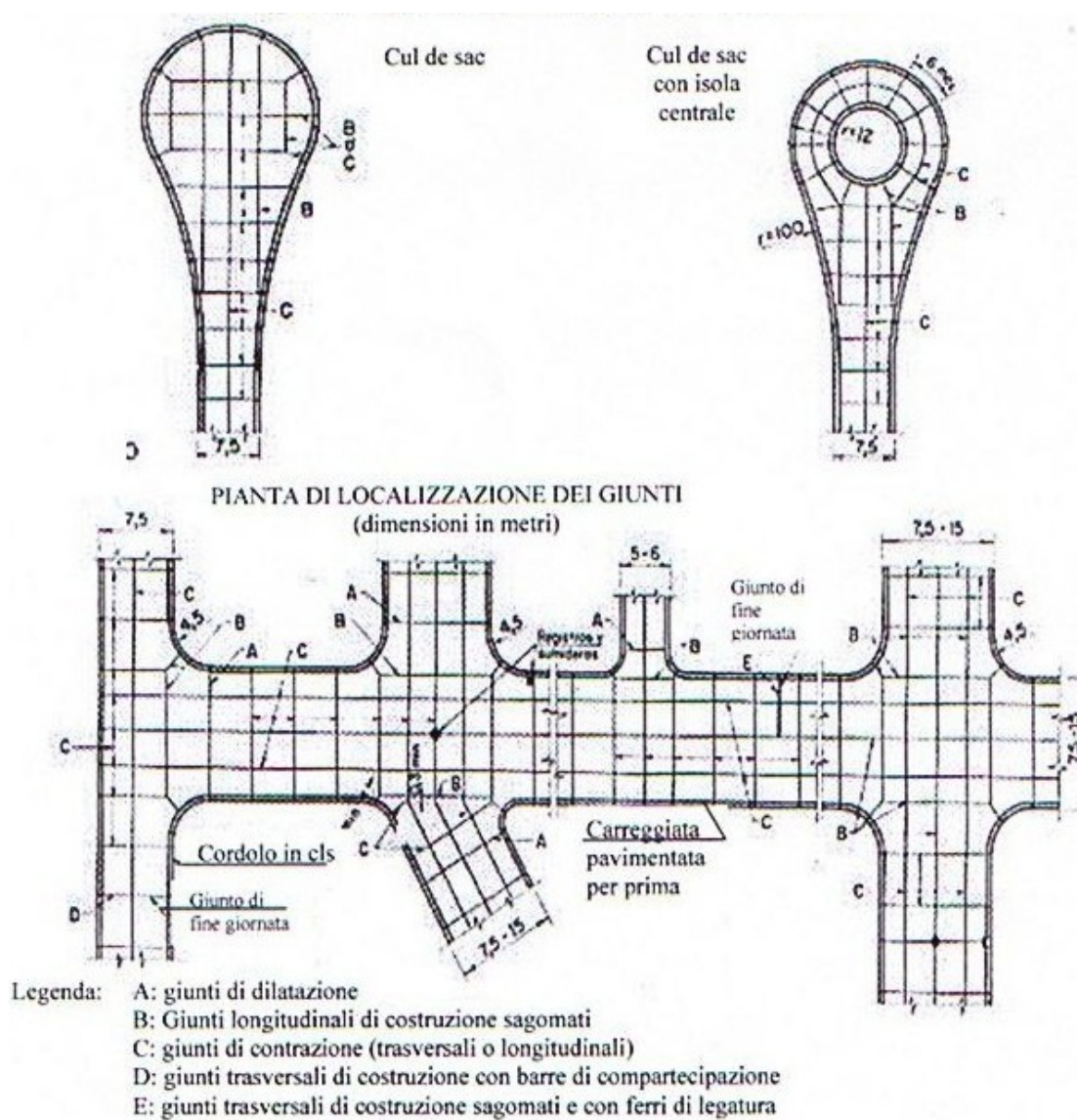
Nel primo caso i giunti devono essere posti all'inizio e alla fine della curva e, quando lo sviluppo della curva supera i 100 m, anche al centro della curva stessa. In presenza di elementi rigidi nella pavimentazione, è bene prevedere in loro corrispondenza giunti di contrazione e di dilatazione onde evitare che questi si formino da soli.

Nelle intersezioni bisogna evitare la formazione di elementi a punta nella lastra; i bordi si dovranno disporre in modo da avere una dimensione minima dei lati della lastra di almeno 30 cm [4].



**Fig. 3.18** – Forma delle lastre in corrispondenza delle intersezioni stradali

Nella figura seguente sono riportate alcune disposizioni tipiche di giunti in ambiente urbano.



**Fig. 3.19** - Disposizioni tipiche di giunti in ambiente urbano.

La composizione della miscela del calcestruzzo non è molto differente da quella usata nella costruzione delle strade extraurbane.

Le differenze sono dovute essenzialmente all'impiego di materiali locali e al raggiungimento di colori e texture mediante impiego di aggregati o tipo di cemento specifici. In genere le miscele per il calcestruzzo delle strade urbane sono composte secondo quanto riportato nella tabella 3 [4].

	Tipo	Quantità
Cemento	Normale	330-350 kg/m <sup>3</sup>
Aggregato grosso: dimensione massima 20 mm	Frantumato / Naturale Calcereo / Siliceo	1100-1350 kg/m <sup>3</sup>
Sabbia: dimensione 0/1 – 0/4 mm Equivalente in sabbia > 75	Calcereo / Siliceo	500-750 kg/m <sup>3</sup>
Acqua/Cemento		0.40-0.55
Additivi	Aeranti Plasticizzanti	3-6% (in zone gelive)
Coloranti	Liquidi In polvere	3-6 % 3 %

**Tabella 3** - Composizione della miscela di calcestruzzo per le pavimentazioni della viabilità urbana.

Nel caso in cui si adotti la tecnica del calcestruzzo martellato l'aggregato grosso, per ovvi motivi, deve essere necessariamente frantumato e duro.

Per un buon risultato nel tempo della pavimentazione rigida la miscela del calcestruzzo deve avere le caratteristiche riportate nella seguente tabella.

Tenore in aria occlusa	3-6 %
Abbassamento al cono di Abhrams	5-10 cm
Resistenza a trazione per flessione a 28 giorni	4,5 MPa
Resistenza a trazione indiretta (prova brasiliana)	2,7 MPa

**Tabella 4** - caratteristiche della miscela di calcestruzzo per le pavimentazioni della viabilità urbana.

Date le dimensioni del cantiere in area urbana, solitamente piccole, in genere non viene mai realizzato un impianto di produzione del calcestruzzo in cantiere; si preferisce un impianto centralizzato fisso e operare l'approvvigionamento del calcestruzzo mediante autocarri a cassone ribaltabile.

La costruzione delle strade urbane in calcestruzzo viene generalmente eseguita con metodi meccanici, anche se i metodi manuali non sono del tutto esclusi, soprattutto nelle aree di limitate dimensione e di difficile accesso.



---

La compattazione del calcestruzzo in opera dipende dal tipo di traffico previsto e può essere eseguita sia con gli aghi vibranti che con le macchine a casseforme scorrevoli.

La superficie finita deve essere liscia ed esente da cavità: una finitura con il fratazzo o con una livellatrice montata sulla macchina è sempre necessaria.

Dopo l'esecuzione del trattamento superficiale voluto per ottenere le caratteristiche di aderenza e di aspetto formale desiderate, la pavimentazione viene pulita con un getto d'acqua ad alta pressione. Viene infine distribuito un prodotto di maturazione allo scopo di evitare fenomeni di ritiro nel calcestruzzo dovuti all'azione degli agenti atmosferici.

Nel caso di calcestruzzo stampato viene anche applicato un prodotto di protezione (resina o cera) in modo da chiudere tutti i pori e tutti i vuoti. Tale prodotto dà al calcestruzzo la sua patina finale e facilita le successive operazioni di pulitura [4].

### **3.2.4.5 PROSPETTIVE PER LE PAVIMENTAZIONI IN**

#### **CALCESTRUZZO NELLA VIABILITÀ URBANA IN ITALIA**

Nella stragrande maggioranza dei casi sono le componenti strutturali a determinare la scelta dell'uso del calcestruzzo nelle pavimentazioni stradali.

Ma è soprattutto nei centri urbani che il calcestruzzo può essere scelto non solo per esse, ma basandosi anche sulle sue caratteristiche formali.

Il rifacimento delle pavimentazioni stradali in tutti quei centri abitati in cui s'incontrano problemi legati al valore architettonico, o comunque dove essi ricevono una particolare attenzione sia da parte degli amministratori che dei tecnici, le capacità d'imitazione di qualsivoglia pietra naturale da parte del calcestruzzo può essere sfruttata appieno.

Nelle città d'impianto storico, con strade spesso anguste, la frequenza degli interventi di manutenzione di altri tipi di pavimentazione, oltre a rappresentare un costo economico, sono un prezzo spesso difficile da sostenere anche dal punto di vista sociale, con i disagi prolungati che arrecano sia ai cittadini che ai gestori del traffico. L'impiego del calcestruzzo, sebbene più oneroso in fase di costruzione, permette di ridurre enormemente i costi dei successivi interventi di manutenzione, essendo questi meno frequenti: sono quindi meno onerosi per i gestori, creano minori situazioni di disagio del traffico e sono quindi meno "fastidiosi" per gli utenti [4].



---

### **3.3 MATERIALI LAPIDEI IMPIEGATI NELLE PAVIMENTAZIONI**

I materiali utilizzati negli anni , per la realizzazione delle pavimentazioni lapidee sono i più vari e connessi alle diverse zone di provenienza.

In generale, le esigenze economiche hanno favorito il reperimento del materiale litico nell'ambito di distanze più ravvicinate possibili e quindi all'utilizzo del cosiddetto materiale "locale".

Di seguito (Tab.5) sono riportati i materiali lapidei impiegati nelle principali città italiane ed in alcune città europee.

Dalla tabella si evince come in Liguria è stata molto impiegata l'arenaria.

In Lombardia e nella Pianura Padana il Granito di S.Fidelino, estratto nelle adiacenze del lago di Como ed il Serizzo, o Granito del Sempione, prodotto nella zona di Novara.

A Milano è anche frequente la presenza del Porfido di Cuasso al Monte (in provincia di Varese).

Nel Veneto e a Venezia strade e piazze sono state in genere pavimentate con la Trachite Masegna, prodotta nei Colli Euganei nella provincia di Padova, e con la pietra d'Istria.

Quest'ultima è un calcare molto resistente alla salsedine marina e per questo è stata molto impiegata nei pedonali veneziani.

In molte città dell'Emilia, in Toscana e a Firenze sono diffuse le arenarie come la Pietraforte, prodotta nella provincia di Firenze ed il meno resistente Macigno, a cemento calcareo, prodotto in genere nell'Appennino centrale.

A Roma, fin dal XVIII si è fatto ricorso al selciato realizzato con elementi ricavati dal Basalto, prodotto soprattutto nell'area dei Colli Albani.

A Napoli le antiche pavimentazioni venivano realizzate con il Piperno, una trachite grigia estratta nell'area dei Campi Flegrei.

Mentre solo dal XVII secolo si è fatto ricorso alla Pietrarsa, una lava prodotta dalle colate del Vesuvio giunto fino alla costa.

Analogamente in Sicilia orientale si è molto impiegata la lava dell'Etna.

Inoltre in tutta Italia, fin dal secolo scorso, è stato impiegato il porfido la cui diffusione è avvenuta dopo la prima guerra mondiale con la produzione di cubetti per la realizzazione di selciati [1].

Città o Regione	Dimensioni in cm		h	Denominazione	Litotipo	Osservazioni
	largh.	lung.				
<b>Liguria</b>	25÷32	70÷120	16÷18	Tacchi	Arenaria	Cave di Taggia, S. Remo.
						Cave di Spezia
<b>Torino</b>	25÷46	50÷100	16÷18	Prismi	Sienite	Cave di Biella
<b>Milano</b>	32÷40	48÷80	15÷16	Masselli	Granito	Posati su sabbia
			15÷18	Lastre	Porfido	Posate su sabbia
<b>Trieste</b>	30÷50	30÷130	16÷20	Basoli	Arenaria	
<b>Firenze</b>	25÷55	35÷65	13÷20	Lastrico	Arenaria	Del tipo Macigno e Pietraforte. Posati in malta o su sabbia
<b>Roma</b>	9,5÷13	9,5÷13	17÷19	Quadrucchi	Basaltica	
	10÷12	10÷12	17÷19	Selci	Leucitica	Posati su sabbia
	22÷25	22÷25	13÷20	Guide	Leucitica	
<b>Palermo</b>	30÷70	40÷70	14÷22	Basoli	Basalto	
<b>Napoli</b>	30÷70	40÷70	14÷22	Basoli	Tefrite	
<b>Berlino</b>	17÷28	17÷20	17÷20	Pflaster-Stein	Basalto	Posati su calce
	8÷16	12÷25	13÷21	Pflaster-Stein	Porfido	Posati anche su ghiaia
<b>Monaco</b>	18÷20	18÷27	20	Pflaster-Stein	Granito	Posati su sabbia
<b>Vienna</b>	18	18÷28	18	Pflaster-Stein	Granito	Posati su calce
<b>Londra</b>	7,5	18	15÷25	Stone-Sets	Granito	Posati su calce
<b>Parigi</b>	10÷14	16÷20	16÷20	Pavé	Granito	Traffico medio
	10	12	12	Pavé	Porfido	Traffico leggero

**Tabella 5** - Elementi tradizionalmente impiegati nelle pavimentazioni lapidee

### 3.3.1 ROCCE IGNEE O MAGMATICHE

La struttura delle rocce ignee ha un particolare significato perché rivela in genere le condizioni di genesi, cioè le modalità di raffreddamento del magma.

Allorché il fuso magmatico stazioni all'interno della crosta terrestre (condizioni plutoniche), il raffreddamento sarà lento, dando luogo ad una cristallizzazione completa della roccia, con cristalli visibili ad occhio nudo.

Nel caso di rocce vulcaniche, esso sarà invece rapido, tanto da dar luogo a cristalli minutissimi o addirittura a vetro.

Le condizioni fondamentali, vulcanica e plutonica, trovano sfumatura reciproca in una serie di condizioni intermedie, indicate come ipoabbissali e sub-vulcaniche.

---

Le *rocce plutoniche* si riconoscono per essere contraddistinte dalla presenza di minerali cristallizzati: si parlerà in tal caso di struttura olocristallina .

Gran parte delle rocce con struttura olocristallina presenta cristalli all'incirca equidimensionali (struttura olocristallina equigranulare).

Si definisce invece struttura olocristallina porfiroide quella in cui, nell'ambito della massa cristallina, si riconoscono taluni cristalli di dimensioni predominanti (fenocristalli), di dimensioni anche dell'ordine dei centimetri.

Le *rocce filoniane* sono particolari rocce intrusive derivanti da cristallizzazione dei fusi residui di più bassa temperatura, talora sotto elevata pressione parziale di gas ed hanno una struttura olocristallina.

Le *rocce vulcaniche* sono caratterizzate da una grana minutissima, non visibile ad occhio nudo: questa struttura è chiamata afanitica.

Se esse sono costituite da vetro la struttura si definisce vetrofirica.

Spesso il magma giunge in superficie con un certo carico di cristalli già segregatesi in profondità (fenocristalli), i quali spiccano sulla massa di fondo dando luogo ad una struttura porfirica.

Le *rocce ipoabbissali* sono, per genesi e struttura intermedia ai due principali gruppi ora visti.

Si formano infatti più vicino alla superficie terrestre rispetto alle rocce plutoniche e cristallizzano in genere sotto una pressione sufficiente a non far sfuggire troppi gas, ma in modo rapido. Tra le rocce ipoabbissali ricordiamo i porfidi.

### **3.3.1.1 PORFIDI**

Sono rocce ipoabbissali, la loro struttura (porfirica) è caratterizzata da grandi cristalli di quarzo e feldspato, immersi in una massa di altri cristalli molto piccoli, originatisi da una solidificazione del magma in tempi diversi.



**Fig. 3.20 - Porfido**

Spesso si rileva la presenza di cavità di degassazione, tappezzate di minerali ben cristallizzati.

Tali rocce presentano un elevato contenuto di silice (oltre il 70%) e pertanto sono caratterizzati da un'elevata resistenza agli agenti esterni.

La superficie esposta dai porfidi rimane scabra ed antisdrucchiolevole anche in presenza di acqua.

Infatti l'attrito a cui è sottoposta la pavimentazione consuma in modo differenziato i vari componenti caratterizzati da una differente durezza.

In particolare con il passare del tempo la superficie del porfido, soggetta all'azione dei veicoli, tende ad usurarsi in modo però differenziato grazie alla presenza di quarzo, il quale essendo un minerale caratterizzato da una maggiore durezza rispetto agli altri minerali presenti nella roccia, si usura di meno garantendo così una microrugosità superficiale.

I porfidi sono prodotti in Italia in grandi quantità soprattutto nel Trentino-Alto Adige (95% del totale) e nella zona di Brescia.

Tali rocce rappresentano il materiale lapideo più idoneo e usato (subito dopo i masselli di cemento) nelle pavimentazioni lapidee [1].

<b>Tipo di roccia</b>	<b>Resistenza a compressione (MPa)</b>	<b>Resistenza a flessione (MPa)</b>	<b>Resistenza all'urto</b>	<b>Usura all'attrito radente(cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Usura al getto di sabbia(cm<sup>3</sup>)</b>
Porfido	180÷300	15÷20	11÷13	5÷8	2,6÷3,5

**Tabella 6 – Caratteristiche meccaniche Porfido**

Tipo di elemento	Dimensione in cm		h	Peso
	lung.	largh.		kg
Cubetti 1	4÷6	4÷6	6	105/m2
Cubetti 2	6÷8	6÷8	8	135/m2
Cubetti 3	8÷10	8÷10	10	190/m2
Cubetti 4	10÷12	10÷12	12	250/m2
Piastrille a spacco regolari 5		10		
		15		
		20		
	a correre	30	2-5	100/m2
		35		
		40		
Lastre irregolari 6	normale diam.	25-30	1-2-5	
	gigante diam.	40-50	3-7	80-100/m2
Binderi 7	20-30	10	6-10	22/ml
		12	10-15	321m I
Binderi giganti	20-40	12	15-20	55/ml
		14		
Cordoni segati 8		5		25/ml
		7		40/ml
	min 40	8	20-25	45/ml
		10		65/ml
		12		85/ml
		15		110/ml
Cordoni a spacco		5		25/ml
		7		40/ml
	min40	8	20-30	45/ml
		10		65/ml
		12		85/ml
		15		110/ml
Cordonetti per aiuole		5-6		25/ml
	min 30	7-8	20-30	35/ml
		10		65/ml
Smolleri 9	a correre	8-13	3-10	180-220/m2
<b>NOTE</b>				
1. Per pavimentazione a traffico pedonale.				
2. Per pavimentazione a traffico misto (pedonale/veicolare).				
3. Per pavimentazione a traffico di forte intensità.				
4. Per pavimentazione a traffico di forte intensità anche con mezzi pesanti e per uso industriale.				
5. Impiegate soprattutto in pavimentazioni per centri antichi.				
6. O ad opera incerta, in vari tipi (sottile, normale, gigante) in rapporto alle dimensioni che possono variare secondo la diagonale media				
7. Per contenimento e delimitazione delle pavimentazioni.				
8. Per formazione di marciapiedi.				
9. Possono essere impiegati di piatto come rivestimento di superfici verticali, oppure di costa, soprattutto per pavimentazioni in forte pendenza.				

Tab

**Tabella 7** – Elementi in porfido di corrente produzione



**Fig. 3.21** – Galleria fotografica elementi in porfido correntemente in uso. Da sinistra in alto, in senso orario: Cubetti; Piastrelle tranciate; Piastrelle segate; Piastrelle coste segate piano fiammato; Piastrelle con lunghezza a correre e con piano levigato; Smolleri; Binderi; Cordoni testa a spacco.

### 3.3.1.2 GRANITI.

Sono rocce vulcaniche intrusive. La loro struttura (granitoide) è caratterizzata da cristalli di grandi dimensioni e di natura diversa, originati da una solidificazione lenta della massa magmatica.

Analogamente ai porfidi anche i graniti sono caratterizzati da una superficie scabra e da un alto contenuto di quarzo che conferisce loro una particolare resistenza agli agenti esterni.

I graniti sono molto impiegati nelle pavimentazioni in Stati Europei come la Germania e la Francia, dove vengono lavorati in cubetti (fino a 10 cm di lato), o in lastre a forte spessore (fino a 20 cm) a superficie scabra (bocciardata o fiammata).

In Italia i graniti vengono impiegati nelle pavimentazioni generalmente in piastrelle di forma parallelepipedica e poste in opera in corsi paralleli con la superficie in vista variamente lavorata (a piano di sega, bocciardata, martellinata, ecc.)[1].



**Fig. 3.22** – Granito

Tipo di elemento	Dimensione in cm		h	Peso
	lungh.	largh.		kg
Cubetti	4÷6	4÷6	6	110/m2
	6÷8	6÷8	8	140/m2
	7÷9	7÷9	9	180/m2
	10	10	10	240/m2
	10	10	5-6	120/m2
Cubetti grandi	15	15	5-8	180/m2
	20	20	5-8	185/m2
Piastrelle (con superficie variamente lavorata)	a correre	20	5-8	185/m2
		30		
Binderi	10	10	20	30/ml
	15	15	30	60jml
Cordoni rettificati alla punta		8	20-22	45/ml
		10		70/ml
	min40	12	25-28	83/ml
		15		95/ml
Con una costa inclinata bocciardati nelle parti in vista		10-12	20	65/ml
		12-15	25	90/ml
	min 40	14-17	28	115/ml
		17-20	30	150/ml
		21-24	30	180/ml
Con testa e costa in vista bocciardate		10	20	65/ml
	min40	12	25	85/ml
		15	25	100/ml
		20	30	150/ml

**Tabella 8** – Elementi in granito di corrente produzione

### 3.3.1.3 LAVA DEL VESUVIO

Le rocce effusive legate all'attività del Vesuvio sono delle Tefriti . Le Tefriti pertanto, essendo delle rocce ignee effusive e quindi generate da un rapido raffreddamento della lava, non hanno subito una cristallizzazione completa della roccia quindi sono caratterizzate da cristalli minutissimi (talora vetro) non visibili ad occhio nudo a meno che la roccia non sia caratterizzata da cristalli già segregatesi in profondità (fenocristalli), i quali spiccano sulla massa di fondo dando luogo ad una struttura porfirica.

La Tefrite ha di solito una struttura porfirica con fenocristalli di feldspatoidi, leucite nel caso di Tefrite leucitica.



**Fig. 3.23** – Tefrite Leucitica

La Lava Vesuviana non garantisce, a differenza del porfido, una microrugosità superficiale in quanto non essendo cristallizzata (raramente vi è la presenza di leucite che non presenta una elevata durezza) è soggetta, a causa dell'azione dei veicoli, ad una usura uniforme che compromette l'aderenza pneumatico-pavimentazione.

Per questo motivo viene creata una scabrosità artificiale tramite le operazioni di bocciardatura o scalpellatura .

In questo modo grazie alla durezza della roccia vulcanica la pavimentazione tende a conservare la scabrosità creata nonostante l'azione di usura.

Per quanto riguarda le dimensioni degli elementi in Tefrite di corrente produzione molto utilizzati a Napoli e provincia sono gli elementi rettangolari con una larghezza di 30-40 cm ed una lunghezza pari a 1,5÷2 volte la larghezza.

La lava del Vesuvio viene anche utilizzata per la realizzazione di selciati ed in questo caso le dimensioni dei cubetti sono le stesse di quelle viste per il porfido.

Tipo roccia	Resistenza a Compressione (MPa)	Resistenza a Flessione (MPa)	Resistenza all'urto (urti necessari per la rottura)	Usura all'attrito Radente(cm <sup>3</sup> )	Usura al getto di sabbia (cm <sup>3</sup> )
Tefrite	60÷180	15÷25	12÷17	5÷9	1,7÷2,5

**Tabella 9** – Caratteristiche meccaniche Tefrite

### 3.3.1.4 BASALTO

Il basalto è una roccia ignea effusiva. La struttura può variare da microcristallina a vetrosa , talora porfirica.

La grana in genere è fine con rari fenocristalli di plagioclasio , pirosseni e/o olivina.



---

Tale roccia presenta un colore molto scuro, fino a nero. Le principali località di provenienza sono la Sardegna ma soprattutto la Sicilia (Etna).

Sono rocce molto tenaci, resistenti (250-400MPa), dotate di elevato peso di volume ( $>2.6\text{t/m}^3$ ).

Forniscono materiali per lastricati e pavimentazioni stradali.

Le dimensioni degli elementi di basalto disponibili in commercio sono le stesse che riguardano la lava del Vesuvio.



**Fig. 3.24 – Basalto**

### **3.3.2 TRAVERTINI**

Sono rocce calcaree sedimentarie di deposito chimico. Il travertino è una roccia che viene impiegata soprattutto nella realizzazione di cordonature per marciapiedi, aiuole e lastre per pavimentazioni pedonali.

Infatti il travertino poco si presta a pavimentazioni carrabili e pedonali, soprattutto se di intenso traffico, ciò in considerazione della sua scarsa resistenza all'usura, ossia della sua tendenza a consumarsi uniformemente assumendo una superficie lucida [1].

### **3.3.3 PIETRE**

A questa categoria appartengono varie tipologie di rocce, riconducibili a due diverse categorie:

- rocce tenere
- rocce dure

Per quanto riguarda il primo gruppo spiccano le arenarie, le quali sono formate da grani di sabbia agglomerati da un legante che può essere siliceo, calcareo, argilloso, ecc.

---

La natura del legante determina la resistenza della roccia che può essere friabile o dura. In ogni caso le arenarie, anche nella varietà più resistente, può essere impiegata solo in presenza di clima favorevole.

Tra le arenarie utilizzate nelle pavimentazioni italiane ricordiamo, la Pietra Forte, il Macigno e la Pietra Serena utilizzate soprattutto nella zona di Firenze.

Del secondo gruppo ricordiamo invece la Trachite Masegna usata soprattutto nel Veneto ed i basalti in particolare la selce usata nell'antichità per pavimentare le strade consolari romane oggi è impiegata sia in cubetti che in lastre [1].

### **3.3.4 PREZZI**

E' stata condotta una analisi dei prezzi relativi ai materiali più usati per la realizzazione delle pavimentazioni lapidee, con particolare interesse alla realtà del Comune di Napoli. Sono stati dunque, messi a confronto i costi relativi alle rocce maggiormente impiegate nel comune partenopeo quindi la lava del Vesuvio con quelle maggiormente usate soprattutto nell'Italia settentrionale ossia il porfido.

Prima di analizzare i prezzi relativi a questi materiali lapidei è bene fare una premessa riguardo alle loro caratteristiche.

Per la realizzazione delle pavimentazioni stradali si richiedono rocce tenaci, durevoli, resistenti all'usura per attrito radente, con composizione polimineralogica e a grana media (per conservare una superficie scabra).

Il porfido del Trentino è una pietra molto resistente dalle caratteristiche uniche nel suo genere, per consistenza e per la moltitudine di colori in diverse e spesso uniche gradazioni. La sua resistenza all'usura, la durezza e la consistente resistenza al gelo fanno di questa pietra la regina dei materiali lapidei proprio in virtù di queste sue particolari caratteristiche.

Proprio per questi motivi determinanti nel settore della pavimentazione di esterni, uniti alla varietà di colori disponibili e alla sua naturale ruvidità, il porfido viene impiegato per qualsiasi tipo di pavimentazione, a partire dal semplice marciapiede fino alla realizzazione di strade e piazze anche sottoposte ad un intenso e continuo traffico pesante. Tra le caratteristiche importanti del porfido va ricordata la sua alta resistenza agli agenti chimici e perciò consigliato l'impiego come pavimentazione nei luoghi dove sia richiesta tale caratteristica.

La roccia, invece, che viene utilizzata a Napoli soprattutto per le pavimentazioni in lastricato è la Tefrite. Tale roccia, a differenza del porfido, non è caratterizzata da una ottima rugosità superficiale né tanto meno offre quella moltitudine di colori che invece è caratteristica del porfido.

Eppure tale roccia, seppur con qualche accorgimento (bocciardatura, ecc.), viene molto utilizzata nei Comuni Partenopei in quanto essendo una roccia locale è caratterizzata da una costante disponibilità ed un costo contenuto dovuto soprattutto all'abbattimento dei costi di trasporto. I prezzi elencati in tabella e relativi ai masselli rettangolari, comprendono i costi per la posa in opera ma escludono quelli relativi alle giunzioni e alla sabbia.

TIPOLOGIA DI ELEMENTI	PREZZI
<b>CUBETTI</b>	
4/6	13-33€/mq
6/8	13-33€/mq
8/10	13-33€/mq
10/12	12-26€/mq
<b>MASSELLI RETTANGOLARI</b>	
<u>larghezza</u> 30-40cm	
<u>lunghezza</u> 1,5÷2 volte la larghezza	
Bocciardato	100€/mq
Lavorato a puntillo	120€/mq

**Tabella 10** – Prezzi relativi alla Lava Vesuviana

TIPOLOGIA DI ELEMENTI	PREZZI
<b>CUBETTI</b>	
4/6	18,9€/mq
6/8	24,3€/mq
8/10	36,1€/mq
10/12	45€/mq
<b>PIASTRELLE A SPACCO REGOLARI CON LUNGHEZZA A CORRERE</b>	
<u>larghezza</u> 10	29-47€/mq
15	32-49€/mq
20	45-55€/mq
30	45-59€/mq
35	45-61€/mq
40	45-70€/mq

**Tabella 11** – Prezzi relativi al Porfido

---

Osservando queste due tabelle si evince che i prezzi relativi ai due materiali lapidei in questione sono sostanzialmente equivalenti. E' ovvio che nel caso del porfido del Trentino Alto Adige, bisogna aggiungere i costi di trasporto che sono abbastanza notevoli e che fanno sì che questa roccia rispetto alla lava vesuviana, che è invece un materiale locale, sia più costosa.

### **3.4 PROBLEMATICHE RELATIVE ALLE PAVIMENTAZIONI IN PIETRA**

Le pavimentazioni in pietra offrono, indubbiamente, il vantaggio di qualificare l'estetica delle strade e dei contesti urbani in cui esse sono adottate.

A fronte di ciò esse mostrano in molti casi caratteristiche funzionali e strutturali non soddisfacenti, sia per ciò che concerne la regolarità del piano viabile che l'aderenza pneumatico pavimentazione.

Di seguito si parlerà di tali problemi analizzando il caso di pavimentazioni in selciato e in lastricato le quali sono le due tipologie di pavimentazioni lapidee più diffuse nei centri urbani delle più grandi città italiane.

#### **3.4.1 PERDITA DI REGOLARITA'**

La perdita di regolarità, comunque fortemente condizionata dalla presenza di giunti inter-elementi di dimensioni non più limitate come all'atto della costruzione, il più delle volte è dovuta sia agli spostamenti (rotazioni e traslazioni) dei masselli o dei blocchetti di pietra conseguenti alle ripetute azioni dinamiche del traffico, sia a non idonee operazioni di ricostruzione della pavimentazione in seguito a lavori di manutenzione (sottoservizi, etc.), sia a cedimenti strutturali connessi alla non adeguatezza della pavimentazione e dei materiali in essa utilizzati in relazione al traffico ed alle condizioni ambientali.

I giunti risultano altresì spesso aperti per inefficacia delle sigillature, non correttamente poste in opera o costituite da materiali non adatti.

I capitoli, inoltre, non sono sempre d'aiuto perché risultano in molti casi obsoleti rispetto alle conoscenze ed alle tecnologie oggi disponibili.

---

La problematica delineata è comune a diverse viabilità urbane, italiane ed in particolare riguarda le pavimentazioni in pietra a masselli, le quali a differenza delle pavimentazioni a "blocchetti", presentano dei giunti che hanno una larghezza che generalmente eccede il centimetro ossia la misura tipicamente prescritta nei capitolati per questa tipologia di pavimentazione.

Il problema dei giunti è causato dalla perdita della linearità e della forma degli spigoli degli elementi prodottasi nel tempo, oppure del distanziamento tra gli elementi generatosi nel tempo o derivante da una non perfetta messa in opera in alcuni punti la larghezza del giunto risulta anche intorno ai 3-4 cm.

Il giunto intermasselli diviene così, dal punto di vista della regolarità del piano viabile, una causa di discontinuità a cui si associano generazione di vibrazioni e rumore all'interno ed all'esterno del veicolo, nonché perdita di comfort nella guida.

Tutto questo comporta un aumento dei costi di manutenzione della pavimentazione nonché dei costi di manutenzione dei veicoli, ed una diminuzione della sicurezza di questi ultimi in particolare quelli a due ruote.

In tale contesto bisogna individuare criteri costruttivi, progettuali e manutentivi per le pavimentazioni in pietra affinché esse possano garantire standard di sicurezza e comfort di circolazione nel rispetto dell'economicità di gestione [6].

### **3.4.2 PRINCIPALI TIPOLOGIE DI DISSESTI RELATIVI ALLE PAVIMENTAZIONI IN ELEMENTI LAPIDEI**

I dissesti relativi alle pavimentazioni lapidee possono interessare i giunti oppure la pavimentazione nel suo complesso.

Per quanto riguarda i degradi relativi ai giunti, i più frequenti sono elencati di seguito [6]:

#### **Eccessiva apertura di giunti non sigillati**

- Tipologia di dissesto:  
I giunti risultano eccessivamente aperti.
- Livello di severità:  
Basso: la larghezza del giunto è compresa tra 1.0 e 2.5.  
Alto: la larghezza del giunto è >2.5 cm.
- Livelli di estensioni:

---

Basso: l'ammaloramento riguarda al più il 10% dei giunti.

Medio: l'ammaloramento è esteso tra il 10% e il 50% dei giunti.

Alto: l'ammaloramento riguarda più del 50% dei giunti.

- Cause:

L'eccessiva apertura dei giunti può essere dovuta ad una non corretta posa in opera o a spostamenti che nel tempo hanno interessato i masselli prevalentemente nell'ambito dello strato di allettamento. Il fenomeno può essere anche connesso a fenomeni di avvallamento o ormaimento.

### **Asportazione di sigillante dai giunti**

- Tipologia di dissesto:

I giunti risultano privi, parzialmente o completamente, della sigillatura.

- Livello di severità:

Basso: del giunto sono state asportate solo piccole porzioni di sigillante, fino al 20% della lunghezza.

Medio: del giunto sono state asportate porzioni di sigillante comprese tra il 20% e il 70%.

Alto: del giunto sono state asportate porzioni di sigillante maggiori del 70%.

- Livelli di estensioni:

Basso: l'assenza di sigillante riguarda al più il 10% dei giunti.

Medio: l'assenza di sigillante è estesa tra il 10% e il 50% dei giunti.

Alto: l'assenza di sigillante riguarda più del 50% dei giunti

- Cause:

La mancanza di legante all'interno di un giunto può essere causata da: profondità di penetrazione del legante inadeguata rispetto alla larghezza del giunto stesso ; -materiale invecchiato e /o infragilito asportato dai veicoli; bassa adesione tra sigillatura e parete del massello.

### **Spandimento di legante sul massello**

- Tipologia di dissesto:

Il legante invece di occupare la superficie del solo giunto occupa parzialmente anche quella del massello.

- Livello di severità:

---

Basso: il sigillante ha oltrepassato, seppur di poco, lo spigolo del massello per brevi tratti.

Medio: il sigillante ha oltrepassato lo spigolo del massello con sbavature laterali di dimensioni limitate (5-6 cm complessivi).

Alto: il sigillante ha oltrepassato lo spigolo del massello con evidenti ed ampie sbavature.

- Livelli di estensioni:

Basso: il fenomeno interessa al più il 10% dei giunti.

Medio: il fenomeno interessa una porzione di giunti compresa tra il 10% e il 50%.

Alto: il fenomeno interessa una porzione di giunti maggiore del 50%.

- Cause:

Il fenomeno è causato da una posa non corretta (eccesso di mastice, sigillatura oltre gli spigoli del giunto) oppure da materiale non idoneo rispetto alle condizioni del traffico e della temperatura.

### **Spostamento superficiale dei masselli, “Dentellamento”**

- Tipologia di dissesto:

La superficie si presenta sostanzialmente planare, ma vi sono irregolarità locali, con un effetto “dentellamento”, causate dallo spostamento superficiale dei masselli

- Livello di severità:

Basso: i dislivelli degli elementi rispetto al piano stradale medio sono sia longitudinalmente e trasversalmente <2cm.

Alto: i dislivelli degli elementi rispetto al piano stradale medio sono longitudinalmente e /o trasversalmente >2cm.

- Livelli di estensioni:

Basso: il dentellamento riguarda al più il 10% della pavimentazione.

Medio: il dentellamento è esteso per il 10-50% della pavimentazione

Alto: il dentellamento riguarda più del 50% della pavimentazione.

- Cause:

Lo spostamento dei masselli dalla loro posizione naturale è causato da un cattivo ammorsamento degli stessi nello strato d'allettamento e/o da una perdita dell'interlock (collaborazione con i masselli adiacenti).

---

### **Eccessiva profondità' della superficie del giunto rispetto al piano dei masselli**

- Tipologia di dissesto:  
Il giunto risulta essere profondo, dando luogo in tal modo ad una sorta di “solco” inter-masselli.
- Livello di severità:  
Basso: la differenza tra la quota del piano viabile e quella della superficie del giunto è compresa tra 0.5 e 1.5 cm.  
Alto: la differenza tra la quota del piano viabile e quella della superficie del giunto è >1.5 cm.
- Livelli di estensioni:  
Basso: il fenomeno interessa al più il 10% dei giunti.  
Medio: il fenomeno interessa una porzione di giunti  
Alto: la differenza tra la quota del piano viabile e quella della superficie del giunto è >1.5 cm.
- Cause:  
Il sigillante è assente, è stato rimosso o non è stato livellato in sommità con il piano dei masselli. La mancanza di sigillante non ha impedito l'asportazione della sabbia di riempimento dal giunto

Trai dissesti invece relativi alla pavimentazione nel suo complesso possiamo ricordare [6]:

### **Avvallamenti della superficie**

- Tipologia di dissesto:  
Avvallamento della pavimentazione di forma approssimativamente circolare o ellittica.
- Livello di severità:  
Basso: gli avvallamenti sono appena visibili e provocano leggere vibrazioni ai veicoli; lo smaltimento delle acque superficiali non avviene in maniera corretta.  
Medio: gli avvallamenti sono nettamente visibili e di entità tale da influenzare il comfort di guida; lo smaltimento delle acque superficiali è compromesso.  
Alto: l'entità del dissesto è tale da rendere difficile il controllo del veicolo e/o dei cicli e motocicli; lo smaltimento delle acque superficiali è gravemente compromesso
- Livelli di estensioni:



---

Basso: la sovrastruttura è interessata dal fenomeno in misura inferiore al 10% della sua superficie.

Medio: la sovrastruttura è interessata dal fenomeno in misura compresa tra il 10% ed il 50% della sua superficie

Alto: il fenomeno interessa una porzione di pavimentazione maggiore del 50%.

- Cause:

L'avvallamento è spesso causato dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione, localmente, o da cedimenti del sottofondo. I sovraccarichi dinamici esaltano ed accelerano l'evoluzione del dissesto.

### **Ormaiamento**

- Tipologia di dissesto:

Deformazione trasversale della pavimentazione lungo le traiettorie dei pneumatici.

- Livello di severità:

Alto: la profondità delle ormaie è  $\geq 2$ cm.

Basso: la profondità delle ormaie è  $< 2$ cm

- Livelli di estensioni:

Basso: la sovrastruttura è interessata dal fenomeno, lungo il percorso delle ruote, in misura inferiore al 10% della sua lunghezza.

Medio: la sovrastruttura è interessata dal fenomeno, lungo il percorso delle ruote, tra il 10% ed il 50% della sua lunghezza.

Alto: lungo il percorso delle ruote, il fenomeno interessa una porzione di pavimentazione maggiore del 50%.

- Cause:

L'ormaiamento è spesso causato dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione, la quale subisce delle deformazioni viscoso permanenti dovute al traffico veicolare soprattutto se canalizzato.

### **Irregolarità Longitudinale**

- Tipologia di dissesto:

Ondulazione longitudinale della superficie della pavimentazione rispetto al piano medio.

- Livello di severità:

---

Basso: ampiezza media  $<2\text{cm}$ , sulla base di 2m.

Alto: ampiezza media  $\geq 2\text{cm}$ , sulla base di 2m.

- Livelli di estensioni:

Basso: la sovrastruttura è interessata dal fenomeno in misura inferiore al 10% della sua lunghezza.

Medio: la sovrastruttura è interessata dal fenomeno in misura compresa tra il 10% ed il 50% della sua lunghezza.

Alto: il fenomeno interessa una lunghezza maggiore del 50%.

- Cause:

L'irregolarità longitudinale è causata da cedimenti non uniformi e dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione

### **3.4.3 PERICOLOSITA' DELLA MARCIA DEI VEICOLI A DUE RUOTE**

I dissesti di cui si è discusso nel paragrafo precedente, creano grandi problemi alla sicurezza ed al comfort di marcia dei veicoli in transito, costringendo le amministrazioni coinvolte ad una continua e costosa manutenzione.

Le pavimentazioni lapidee degradate costituiscono situazioni di rischio potenziale percepite ed effettive soprattutto per i veicoli a due ruote, la cui ridotta stabilità intrinseca può essere compromessa dalle irregolarità superficiali del piano stradale.

Ai fini della misura delle prestazioni attuali di sicurezza della strada, e conseguentemente della programmazione della manutenzione, è necessario definire classi di severità del dissesto in relazione al rischio reale indotto sui veicoli.

La perdita di controllo durante la marcia dei veicoli a due ruote a seguito di sollecitazioni indotte da irregolarità superficiali della pavimentazione, si caratterizza per la notevole varietà e complessità dell'innescò e dell'evoluzione dei meccanismi perturbativi, che si traducono in situazioni pericolose per l'utente.

È pertanto necessario ricorrere a modellazioni meccaniche del sistema uomo-veicolo che permettano di simulare la marcia dopo l'impatto con un'accuratezza sufficiente, col vincolo che il dettaglio del modello e la durata della simulazione non compromettano, con un onere di calcolo insostenibile, l'analisi di un'ampia casistica di situazioni di rischio potenziale [7].

Un buon compromesso, proposto in una ricerca del Politecnico di Milano, è stato individuato in un modello di tipo multibody, riproducendo il veicolo ed il corpo umano alla guida, nonché la sottostante pavimentazione.

Questo modello ha considerato diverse situazioni di rischio come per esempio [7] :

- la deviazione trasversale della traiettoria della ruota anteriore che può dar luogo, nel caso di presenza di inserzioni tranviarie, al transito della ruota sulla rotaia con repentino abbattimento dell'aderenza al contatto ed eventuale caduta in gola della rotaia.
- Possibile danneggiamento della ruota.
- Perdita della corretta posizione di guida, in particolare lo scivolamento del bacino del ciclista in avanti.
- Perdita del contatto mano-manubrio, ecc.

#### 3.4.4 VIBRAZIONI INDOTTE DAL TRAFFICO VEICOLARE

L'irregolarità della superficie stradale, generata dai dissesti presenti sulla pavimentazione, induce un movimento verticale oscillante nei veicoli in transito.

Queste forze oscillanti causano disagi, l'affaticamento meccanico del veicolo, aumento del tasso di deterioramento della pavimentazione, sovraccarichi dinamici trasmessi all'interdo dell'abitacolo del veicolo ed inducono vibrazioni che si propagano attraverso gli strati della pavimentazione fino al sottofondo e, attraverso le strutture delle fondamenta delle costruzioni, fino alla parte elevata delle stesse [8].

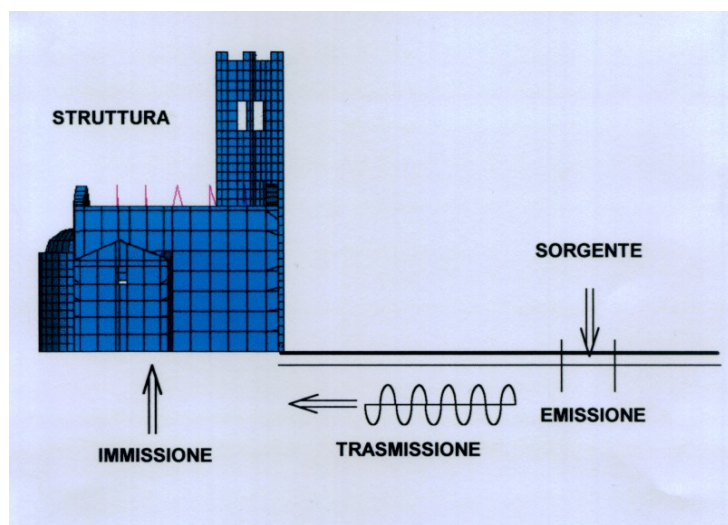


Fig. 3.25 – Schema di propagazione delle vibrazioni

---

E' ovvio che il rotolamento delle ruote sulla superficie stradale genera emissioni sonore il cui livello all'interno e all'esterno del veicolo dipende dalla natura della pavimentazione.

Pavimentazioni uniformi e levigate attenuano le emissioni sonore che, al contrario, vengono esaltate da discontinuità e ruvidità dei materiali come nel caso di elementi di pietra e di apparecchiature che prevedono discontinuità e giunti in evidenza.

Le ampiezze e le frequenze delle forze emozionanti che si generano sulla superficie della pavimentazione dipendono dalle molte variabili che riguardano l'interazione veicolo-pavimentazione.

Le irregolarità della superficie della carreggiata rappresentano l'input nel sistema dinamico; il loro formato e la distribuzione spaziale influenzano notevolmente la risposta del veicolo.

Sono stati effettuati molti studi sperimentali per identificare il rapporto che esiste fra le caratteristiche di rugosità della pavimentazione e la reazione dinamica del veicolo e le caratteristiche delle vibrazioni che vanno ad interessare strutture localizzate ad una certa distanza dalla strada.

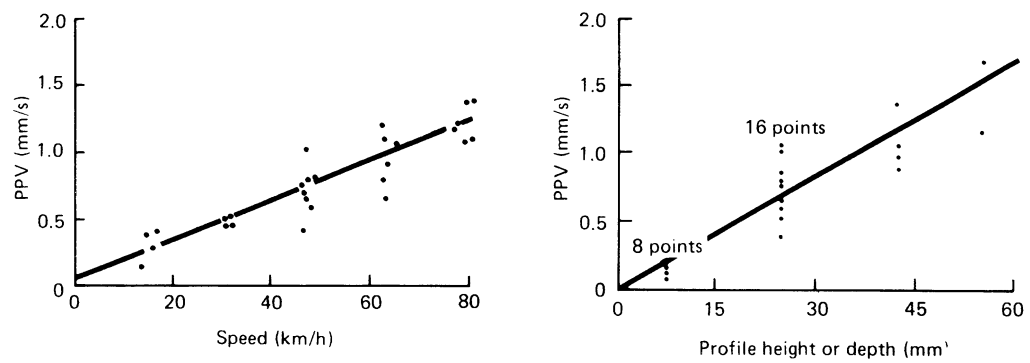
Sono state effettuate vaste campagne sperimentali curate dal laboratorio di ricerca Britannico della strada nel 1971 (Whiffin e Leonard, 1971), aggiornate e completate da (Watts, 1990) attraverso esperimenti effettuati in Norvegia.

Durante questi esperimenti è stata studiata e misurata l'influenza dell'altezza dei depositi artificiali o della presenza di depressioni di larghezza differente, sulla velocità verticale di picco della particella (PPV); misurata a distanze diverse dal bordo della strada, e prodotta da veicoli utilitari che viaggiano a velocità differenti in posizioni differenti.

Le figure 3.26 a) e b) mostrano alcuni dei risultati ottenuti.

Il PPV misurato a 6 m. dal bordo della pavimentazione, dovuto la presenza di un deposito d'altezza 25 millimetri, aumenta molto con l'aumentare della velocità (figura 3.26 a) ed aumenta pure con l'aumento dell'altezza o della profondità delle irregolarità (figura 3.26 b).

I valori assoluti misurati di PPV eccedono molto facilmente i valori di soglia per la percezione umana, e raggiungono il valore critico di 1 mm/s in corrispondenza di piccole irregolarità e di velocità che assumono generalmente i veicoli di trasporto pubblico nelle aree urbane [8].

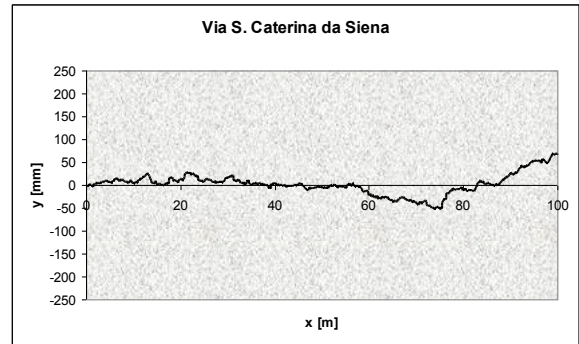


**Fig. 3.26** – a) Diagramma velocità-PPV; b) Diagramma irregolarità-PPV.

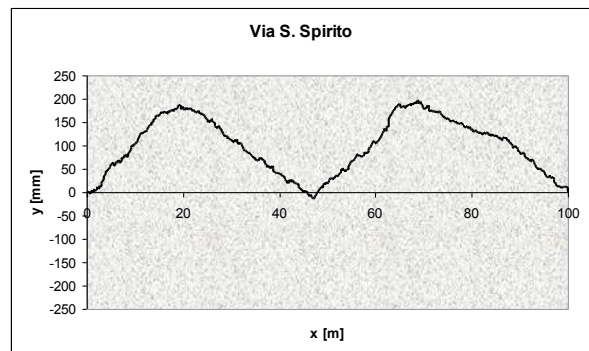
Per valutare l'irregolarità della pavimentazione e le successive vibrazioni da essa prodotte, deve essere preliminarmente acquisito il profilo stradale. Attualmente per le misurazioni di profilo vengono impiegati quasi esclusivamente i profilometri (di cui si è parlato ampiamente in precedenza)

Il profilometro fornisce il profilo della pavimentazione, ossia la deviazione della superficie della pavimentazione da un piano ideale di riferimento, come un campionamento effettuato con un prefissato passo.

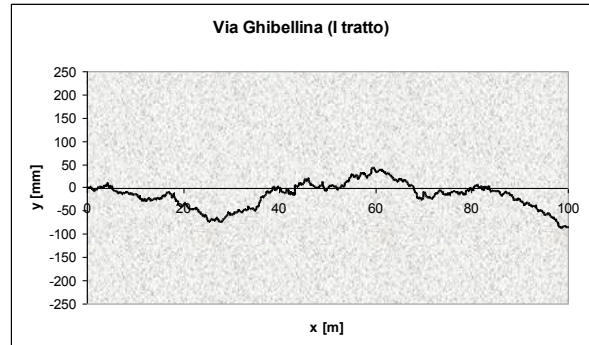
Di seguito sono rappresentati i profili longitudinali di diverse tipologie di pavimentazioni lapidee [8].



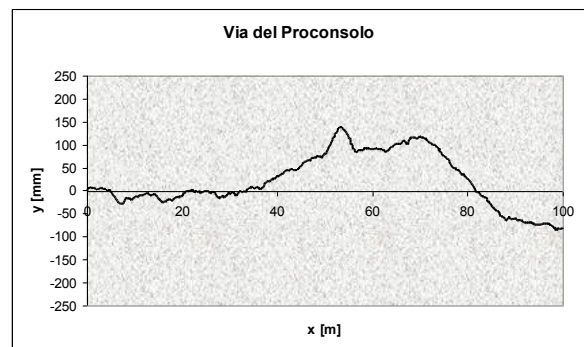
**Fig. 3.27** – Pavimentazione in porfido.



**Fig. 3.28** – Pavimentazione in granito.



**Fig. 3.29** – Pavimentazione in pietraforte



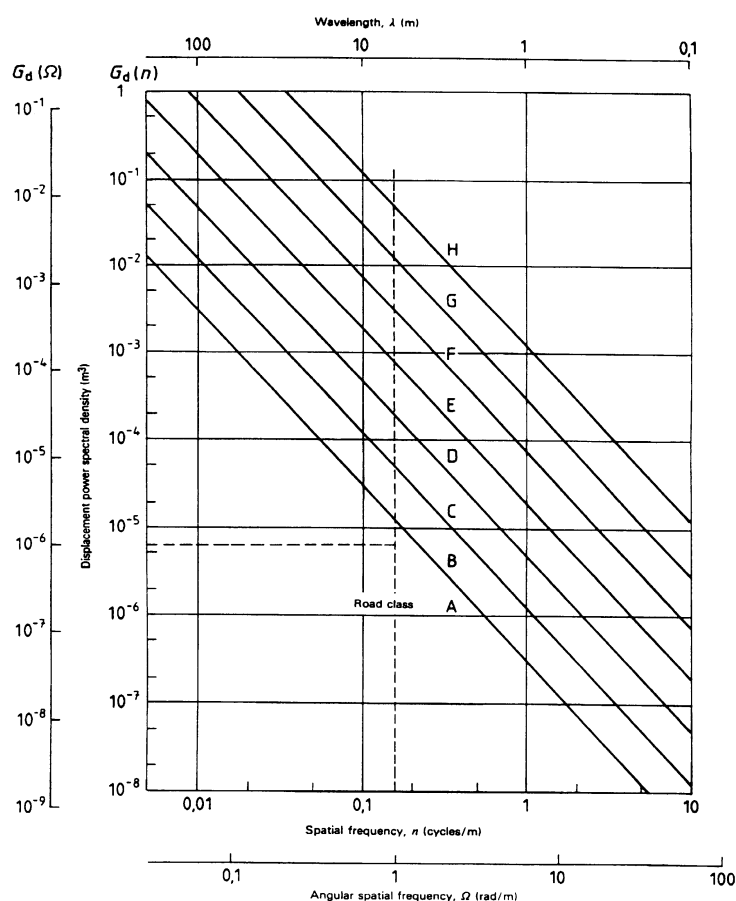
**Fig. 3.30** – Pavimentazione in macigno

Dai profili si evince come le pavimentazioni in lastricato sono caratterizzate da una irregolarità superficiale più spinta rispetto alle pavimentazioni in selciato, proprio a causa delle evidenti discontinuità dovute alla eccessiva ampiezza dei giunti intermasselli.

Per confrontare i diversi profili visti sopra e per classificarli in termini di grado di rugosità, allo scopo di analizzare le vibrazioni prodotte dal passaggio di veicoli, la norma ISO 8608 suggerisce di valutare il profilo longitudinale della pavimentazione mediante rappresentazione attraverso funzione densità spettrale di potenza delle accelerazioni verticali (PSD).

La norma ci fornisce un grafico a doppia entrata che presenta otto classi di irregolarità dalla A (caso più favorevole) alla H (caso più grave).

Entrando con la PSD e la frequenza spaziale si ottiene la classe di rugosità a cui appartiene la pavimentazione in questione [8].



**Fig. 3.31** – Classi di irregolarità proposte dalla norma ISO 8608

---

### **3.4.5 IL PROBLEMA DELL'ADERENZA.**

Il problema dell'aderenza è connesso alla microrugosità e alla macrorugosità della superficie stradale.

La microrugosità dipende fondamentalmente dal tipo di materiale utilizzato. Nel caso di pavimentazioni lapidee i materiali che si possono utilizzare sono svariati, quelli però che presentano una superficie più scabra sono i porfidi e i graniti.

Tali materiali hanno infatti una resistenza all'usura per attrito molto elevata ed inoltre conservano una superficie antisdrucchioleale anche in presenza di acqua.

Qualora si usassero le lave quali materiali per le pavimentazioni in lastricato, che sotto l'azione del traffico tendono a lisciarsi, gli elementi andranno necessariamente bocciardati o martellinati al fine di creare una superficie irregolare.

La macrorugosità è invece determinata dai giunti, dalla loro natura e frequenza pertanto è connessa anche alla dimensione degli elementi ed alla lavorazione dei loro bordi.

Un altro aspetto connesso alla macrorugosità è quello relativo al drenaggio superficiale che dipende sia all'impermeabilità o meno dei giunti sia alla pendenza della strada.

Ciononostante, l'aderenza complessiva che, soprattutto in caso di pioggia, le pavimentazioni lapidee sono in grado di esplicare ha sempre dato adito a perplessità e dubbi.

Il problema della frenatura su tali pavimentazioni merita comunque un adeguato approfondimento in relazione soprattutto all'interazione dinamico-pneumatico-giunto, per mettere in luce il ruolo effettivo svolto dai giunti durante la frenatura.

### **3.4.6 PORTANZA DEL SOTTOFONDO**

Come visto prima alcuni dissesti, soprattutto quelli relativi alla pavimentazione nel suo complesso, sono dovuti ad inadeguatezza strutturale degli strati sottostanti della pavimentazione.

Il monitoraggio delle caratteristiche strutturali di una pavimentazione stradale, viene effettuato tramite la prova con piastra, il deflettometro Benkelmann oppure il Falling Weight Deflectometer (FWD) [9].



---

### **Prova con piastra.**

La prova consiste nel caricare con incrementi successivi e regolari una piastra rigida circolare appoggiata sul terreno di prova, misurando il cedimento corrispondente ad ogni gradino di carico, con possibilità di effettuare cicli di carico e scarico.

I risultati delle prove sono restituiti sotto forma di diagrammi carico-cedimenti.

L'obiettivo della prova è quello di valutare il modulo di deformazione che è una misura convenzionale della capacità portante dei terreni di sottofondo [9].

### **Deflettometro Benkelmann.**

Tale prova misura la deflessione verticale della superficie di una sovrastruttura o di un sottofondo stradale quando questa è soggetta ad un carico verticale di 50 KN trasmesso da una coppia di ruote gemellate di un autocarro gonfiate a 0,7 MPa.

La prova può essere eseguita misurando la deflessione per effetto dell'avvicinamento o, più comunemente, dell'allontanamento del carico sul punto in esame.

A titolo indicativo si riportano i valori di deflessione che si possono riscontrare su pavimentazioni che offrono condizioni di portanza che vanno da un valore ottimo ad uno molto scarso[9].

<b>Deflessione(mm)</b>	<0,5	0,5÷0,6	0,6÷0,7	0,7÷0,8	>0,8
<b>Portanza</b>	ottima	buona	mediocre	scarsa	molto scarsa

### **Falling Weight Deflectometer (FWD).**

In alternativa alla trave di Benkelmann, può convenientemente essere adottato un sistema ad alto rendimento, in grado di effettuare le misure con maggiore semplicità e precisione.

Il principio di funzionamento di tale apparecchiatura è basato sull'applicazione di una massa cadente su una piattaforma connessa, per mezzo di una serie di molle, con una piastra appoggiata sulla pavimentazione.

Dopo aver posizionato l'apparecchiatura sul punto di prova, la massa battente viene lasciata cadere da una altezza che può variare da 2 a 40 cm, producendo una sollecitazione di tipo sinusoidale che simula quella che si genera al passaggio di un veicolo in transito a 50÷60 Km/h.

---

La piastra di carico normalmente impiegata è rivestita in gomma, per distribuire l'impulso del carico uniformemente su una superficie del diametro di 30 cm. Le deflessioni sono misurate per mezzo dei trasduttori (geofoni) [9].

I risultati delle prove Benkelmann o FWD e con piastra, sono utilizzati per verificare la reciproca collaborazione tra i masselli, nella risposta alle sollecitazioni esterne.

Più in particolare, il procedimento di verifica utilizzato consiste nel determinare, in base alle caratteristiche meccaniche della pavimentazione, il cedimento del massello che si sarebbe dovuto verificare sotto carico in assenza di collaborazione da parte dei masselli adiacenti e confrontarlo con quello che si è invece effettivamente avuto con la prova Benkelmann o FWD .

Nel caso in cui il primo risulti superiore al secondo vuol dire evidentemente che il massello caricato riceve collaborazione da parte dei masselli adiacenti [9].

### **3.4.7 SIGILLATURA DEI GIUNTI DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE**

I giunti sono tradizionalmente realizzati in sabbia formando un insieme in grado di esplicare proprietà strutturali tra gli elementi, definite in letteratura con il termine “interlock”, termine con il quale si intende la reciproca collaborazione strutturale tra i masselli tramite i giunti.

In tale contesto assume un ruolo fondamentale la sigillatura del giunto a cui si richiede, oltre che di ripristinare la regolarità del piano viabile, di inibire la penetrazione dell'acqua nel piano di posa e d'impedire l'asportazione della sabbia di riempimento del giunto, da parte dei veicoli o della stessa pioggia.

La sigillatura tradizionale è effettuata tipicamente con mastice bituminoso. Una sua formulazione tipica è la seguente: bitume a penetrazione 80-100 (30-50 % in peso), sabbia silicea fine passante al setaccio ASTM n°40 (25-30 % in peso), additivo (cemento o polvere minerale) passante per un minimo dell'85% al setaccio ASTM n°200 (25-35 % in peso).

La miscela è costituita e posata ad una temperatura compresa tra i 150°C e i 180°C. Il bitume può essere addizionato con polimeri. Nella pratica, però, questo tipo di sigillatura ha posto numerosi problemi.

---

Tra i dissesti più diffusi vi sono l'asportazione di sigillante dai giunti e lo spandimento di legante sul massello [10].

Le cause principali di tali dissesti sono da ascrivere alla non corretta posa in opera o alla scelta di materiali inadatti (fragili, troppo suscettibili alle alte temperature, soggetti a rapido invecchiamento), alla profondità inadeguata di penetrazione del sigillante, alla bassa adesione tra sigillatura e parete lapidea o all'eccesso di sigillante

E' stato studiato un materiale alternativo e innovativo rispetto al mastice bituminoso: una resina poliuretanica da percolare nel giunto di sabbia allo scopo di far nascere legami di coesione interna alla sabbia stessa e di adesione con le pareti dei masselli.

Su questo materiale sono state eseguite prove di laboratorio, atte a determinare il processo di percolazione, si è proceduto all'esecuzione di prove di laboratorio in vera grandezza, per verificare il reale comportamento della resina all'interno di un giunto, e una prova in sito, per verificare il comportamento della pavimentazione sigillata sottoposta a carichi veicolari.

Esperienze eseguite su giunti di pavimentazioni a "blocchetti " hanno fornito positivi risultati nel caso invece delle pavimentazioni a masselli, la larghezza del giunto pone ulteriori problemi.

Pertanto è stata effettuata una sperimentazione specifica presso il Politecnico di Milano, relativa alle pavimentazioni a masselli. La prima fase della sperimentazione ha portato alla determinazione dei tempi e delle profondità di percolazione raggiunte dalla resina all'interno del giunto.

Due differenti tipi di sabbia sono stati sperimentati al fine di poter verificare l'influenza della curva granulometrica. Si è quindi proceduto alla valutazione dei dosaggi di resina in funzione delle caratteristiche geometriche del giunto.

Successivamente sono state realizzate prove di laboratorio in vera grandezza previa costruzione di un campione di pavimentazione a masselli.

Durante questa fase si è seguito il processo di percolazione e di presa della resina. Si sono altresì verificate le doti di elasticità del giunto e di adesione della sabbia al massello. Contemporaneamente si sono eseguite delle prove di controllo dell'aderenza sul massello, in quanto essa può risultare inficiata dalla inevitabile presenza di resina proveniente dalla procedura di percolazione.

La sperimentazione in sito (eseguita in una intersezione della viabilità milanese) ha permesso la verifica del comportamento della resina in esame in presenza di traffico veicolare [10].

---

### 3.4.7.1 SABBIE PER IL RIEMPIMENTO DEI GIUNTI.

Le curve granulometriche analizzate sono state due. La prima è quella usualmente utilizzata dal Comune di Milano (denominata di seguito sabbia “Milano”). Essa è stata scelta con lo scopo di determinare le caratteristiche della sabbia già in uso e verificarne il comportamento dopo la percolazione della resina poliuretanica.

La seconda sabbia (denominata sabbia “Poli”) è stata appositamente formulata presso il Laboratorio Sperimentale Stradale del Politecnico di Milano.

Le curve granulometriche di dette sabbie sono riportate nella Tabella seguente [10]:

Setacci [mm]	Sabbia Poli [% passante]	Sabbia “Milano” [% passante]
12.70	100	100
9.52	100	100
6.35	100	99.60
4.76	100	98.32
2.00	99.92	69.27
0.42	41.54	29.33
0.18	6.73	5.82
0.075	0.71	1.31

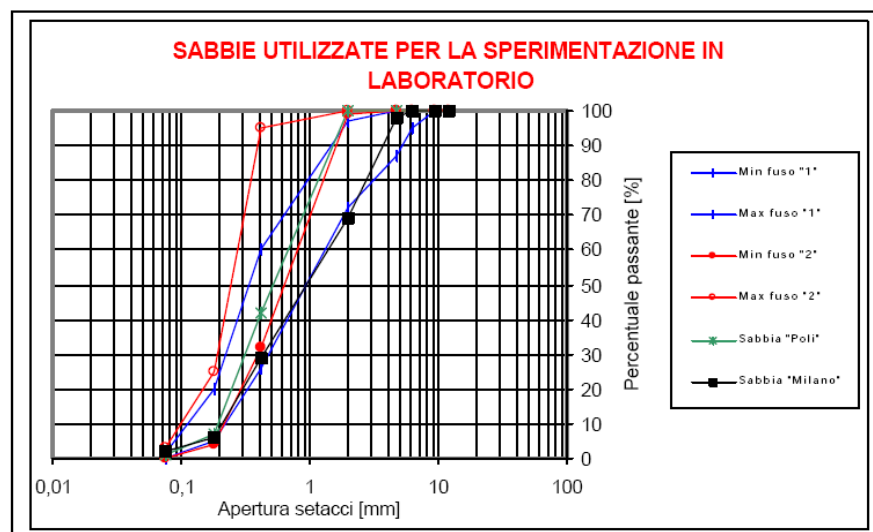
**Tabella 12** – Curve granulometriche sabbie per giunti

La curva della sabbia tipo “Poli” è stata definita in modo da rientrare all’interno di due fusi: il primo è quello riscontrato dall’analisi dello stato dell’arte (Fuso “1”), l’altro è quello suggerito dall’azienda produttrice della resina (Fuso “2”). I fusi sono i seguenti [10]:

Setacci [mm]	Fuso “1” [% passante]	Fuso “2” [% passante]
12.7	100	100
9.52	100	100
6.35	95-100	100
4.76	87-100	100
2.00	72-97	95-100
0.42	26-60	32-100
0.18	5-20	4-25
0.075	0-1.5	0-3

**Tabella 13** – Fusi di riferimento

Il confronto tra le sabbie utilizzate per la sperimentazione e i fusi granulometrici di riferimento è riportato nel grafico seguente [10]:



**Fig. 3.32** – Confronto tra le curve granulometriche della sabbia “Milano” e “Poli” e i fusi granulometrici di riferimento.

Per quanto concerne la percentuale di materiale passante al setaccio ASTM 200 è sempre consigliabile che essa sia inferiore al 3%, meglio se all’1.5%.

Si ritiene che percentuali maggiore di elementi fini siano una delle cause principali dei dissesti delle pavimentazioni ad elementi lapidei: ciò per effetto di una consistente riduzione della capacità di drenaggio dell’acqua da parte della sabbia che comporta una sensibile riduzione della resistenza a taglio della stessa. Come si può evincere dalla

---

figura, la sabbia “Milano” ha una granulometria che rientra, seppur di poco, all’interno del fuso “1”, ma è completamente esterna al fuso “2” [10].

La sabbia “Poli”, invece, ha una curva granulometrica di poco discosta dalla curva minima “2”, ma rientra per la quasi totalità all’interno del fuso “1”: ha solo una quantità di elementi di maggior diametro leggermente eccedente [10].

La resina poliuretanica utilizzata (di seguito denominata semplicemente resina oppure sigillante) è un prepoliuretano a bassa viscosità mono-componente a base uretanica, disperso in un solvente (aromatico o alifatico, normalmente idrocarburo).

È un poliuretano con struttura molecolare reticolata; il suo processo di reticolazione durante la fase di presa risulta condizionato dalla presenza dell’umidità, contenuta sia nel sottosuolo che nell’aria.

La resina, stoccata in taniche, è utilizzata direttamente senza ulteriore diluizione e senza l’aggiunta di eventuali reagenti. Durante le fasi di messa in opera la temperatura atmosferica deve essere possibilmente compresa tra i 3°C e i 30°C. La resina evidenzia resistenze chimiche elevate rispetto a molti solventi e a sostanze chimiche (come ad esempio cloruro di calcio, etere, glicerina), carburanti, sostanze antigelo, oli per motori. Da un punto di vista ecologico non è inquinante perché, non essendo solubile in acqua, non si disperde nel sottosuolo[10].

#### **3.4.7.2 PROVE DI LABORATORIO.**

Le prove di laboratorio sono consistite nell’effettuazione di percolazioni di resina in campioni di sabbia. L’obiettivo è quello di determinare la cinematica del liquido all’interno delle due differenti curve granulometriche della sabbia, prima descritte. Con l’intento di simulare le reali condizioni in cui avviene la sigillatura, la percolazione è stata eseguita con il metodo a “battenti”. Il battente utilizzato corrisponde ad 1 cm (dislivello medio riscontrato in sito tra la sommità del giunto e la superficie del massello). Il procedimento adottato consiste nel versare la quantità di resina relativa ad un battente ed attendere la sua completa percolazione; solo successivamente si procede alla percolazione del successivo battente [10].

Con l’impostazione dell’altezza del battente, la quantità di resina versata risulta direttamente proporzionale al diametro del tubo utilizzato. Il numero di battenti percolati per ogni prova è 11. Questo valore è stato determinato sulla base dei risultati di prove preliminari: la quantità di materiale dopo 11 battenti è tale da bagnare quasi

---

totalmente anche lo strato d'allettamento sottostante. I tubi impiegati sono di diametro 0.94 cm e 2.98 cm (valori rappresentativi della larghezza minima e massima dei giunti riscontrati in sito); l'altezza del giunto considerata (secondo normativa UNI 2718) è di 15 cm. La sabbia adoperata è stata preventivamente asciugata in forno. A parità di diametro e di resina complessivamente percolata, la percentuale della stessa trattenuta nei 15 cm del giunto risulta maggiore all'interno della sabbia tipo "Poli" (sabbia con la maggior percentuale di vuoti). Comunque mediamente si ha un riempimento del 80-87 % dei vuoti. In generale si può asserire che la quantità di contenuto solido trattenuto per unità di volume è compresa tra 53-64 mg/cm<sup>3</sup> [10].

### **3.4.7.3 PROVE DI LABORATORIO IN VERA GRANDEZZA**

Per valutare l'efficacia di un giunto reale ottenuto percolando la resina poliuretanica all'interno della sabbia di riempimento, sono state effettuate delle prove di laboratorio in vera grandezza.

Particolare attenzione è stata dedicata alla verifica:

- della capacità adesiva del giunto alle pareti dei masselli;
- della capacità deformativa del giunto in seguito a movimenti mutui tra masselli contigui.

Sono stati posizionati cinque masselli su uno strato d'allettamento in sabbia tipo "Milano". Quindi, dei quattro giunti realizzati (divisi in due parti in modo d'avere operativamente 8 giunti analizzabili) due sono stati riempiti con sabbia tipo "Milano" e i restanti due con sabbia tipo "Poli". I giunti avevano tutti ampiezza pari a 2 cm. Per tutti i giunti la sabbia è stata preventivamente essiccata in forno.

La quantità di resina percolata è stata determinata in funzione del volume dei giunti e dei dati ricavati dalle percolazioni di laboratorio, in modo da riempire circa l' 85 % vuoti presenti.

In funzione dei risultati ottenuti dal primo gruppo di prove con resina "RP1" si è costruito un altro stralcio di pavimentazione, identico a quello precedente, e si è realizzato un secondo gruppo di prove utilizzando questa volta la "RP2".

Il quadro delle prove è riportato in tabella [10]:

Apertur a giunti	RP1		RP2	
	Sabbia Milano	Sabbia Poli	Sabbia Milano	Sabbia Poli
	1 gg	1 gg	1 gg	1 gg
	7 gg	7 gg	7 gg	7 gg
	15 gg	15 gg	15 gg	15 gg
	28 gg	28 gg	28 gg	28 gg

**Tabella 14** – Quadro delle prove.

Il metodo di posa della resina oltre a comportare un effetto bagnato della superficie del massello, dà luogo ad una riduzione della rugosità della pietra, e conseguentemente dell'aderenza pneumatico-massello.

Per verificare tale condizione sono state eseguite delle prove di controllo dell'aderenza tramite "Skid tester". Il test è stato eseguito prima e dopo la sigillatura dei giunti. L'apertura dei primi due giunti sigillati con la resina poliuretanica "RP1" è avvenuta 24 ore dopo la posa in opera. In entrambe le sabbie la resina ha raggiunto lo strato d'allettamento ed il primo centimetro del giunto risulta completamente reticolato. Dopo 7 giorni, la reticolazione della resina percolata nella sabbia "Milano" si è estesa ai primi 6 cm di giunto. I successivi 4-5 cm di giunto presentavano, invece, un parziale indurimento. Il giunto incominciava ad evidenziare un comportamento rigido ed una non adeguata adesione al massello.

La stessa situazione si presentava anche per il giunto riempito con sabbia tipo "Poli", solo che l'indurimento si è sviluppato per i primi 5 cm e quello parziale per i successivi 3-4 cm.

Entrambi i giunti, dopo 15 giorni, sono induriti per ben 13 cm ma risultano ancor più fragili e friabili, in modo particolare quelli realizzati con sabbia tipo "Milano". Dopo 28 giorni i giunti apparivano completamente asciutti, essendo il solvente completamente evaporato; sono molto fragili e presentano una non adeguata adesione al massello. Risultati migliori, dal punto di vista prestazionale, si sono ottenuti con la resina poliuretanica a formulazione più elastica "RP2" [10].

I tempi di percolazione e reticolazione sono praticamente identici a quelli precedenti ma si riscontra migliore aderenza al massello, maggiore adesione intergranulare, minore friabilità ed una certa elasticità del giunto.

Le caratteristiche della sigillatura risultano suscettibili, in parte, al metodo di posa non essendo tecnicamente possibile effettuare la saturazione del giunto ed in parte alla granulometria della sabbia.



---

Il liquido, infatti, non sempre si interpone tra le superfici di contatto dei granuli, ma va a riempire parte dei vuoti esistenti e a ricoprire solamente in parte la superficie del granulo; quindi nelle aree in cui non c'è adesione tra due granuli contigui si ha il possibile reciproco distacco.

Per quanto riguarda la granulometria, invece, elasticità e compattezza maggiore si hanno con l'utilizzo di sabbia fine (nel caso in esame si deve fare riferimento alla sabbia tipo "Poli" perché presenta particelle granulometriche più piccole ed uniformi). Per quanto concerne lo Skid Test si è constatata una drastica riduzione dell'attrito radente dopo la sigillatura [10].

#### **3.4.7.4 PROVE IN SITO**

La prova in sito, atta a verificare il comportamento di giunti sigillati con resina poliuretanica in presenza di traffico veicolare, è stata eseguita in un incrocio semaforizzato con traffico sostenuto, in prevalenza autoveicoli (Piazza L. Da Vinci, Milano). L'area sottoposta a sigillatura è parte centrale di un incrocio semaforizzato. La prima operazione eseguita è stata quella di ripulire il giunto dalla sigillatura in mastice bituminoso in modo manuale ; e i giunti sono stati poi svuotati per almeno 4 cm dalla sabbia presente con l'utilizzo d'aria compressa.

Quindi, i giunti sono stati di nuovo colmati con sabbia "Milano" tramite l'utilizzo di scope con setole, dopo aver cosperso la superficie con la stessa. La sabbia è stata successivamente costipata. Il giunto così preparato è stato quindi sigillato facendo penetrare la resina poliuretanica con l'ausilio di annaffiatoio e scope [10].

La quantità di sigillante versato corrispondeva alla colmatura del battente (il processo si è ripetuto per tre volte). Successivamente, il liquido rimasto sul massello è stato distribuito sull'intera superficie con lo scopo di ridurre lo spreco di materiale, di limitare lo spessore della pellicola di poliuretano che rimane sulla pietra e di rendere la superficie uniforme.

La pellicola di poliuretano che si forma è asportata nel tempo dall'azione dei pneumatici, eliminando l'effetto bagnato e riportano la pavimentazione al colore naturale.

Per quanto concerne il processo di reticolazione del sigillante si può asserire che è incominciato due ore dopo la posa in opera. Dopo 24 ore il giunto si presentava completamente asciutto e reticolato solamente per i primi 3 mm di profondità,

mantenendo comunque le caratteristiche elastiche desiderate. Le prime fessure, tra giunto e massello, sono apparse dopo circa 15 giorni. Dopo 28 giorni il solvente risultava completamente volatilizzato, il giunto però sembrava molto più fragile con più evidenti fessure tra giunto e massello [10].

Le peculiarità della resina poliuretanica fanno sì che, se percolata in quantità elevate, penetra anche nello strato d'allettamento generando sprechi di materiale. A fronte di ciò, si è determinata la quantità di materiale da versare (quantità uguali per entrambi le resine avendo circa uguale viscosità e tempi di reticolazione), in funzione dei metri quadrati di pavimentazione e all'ampiezza media dei giunti.

Le dimensioni, almeno teoriche, dei masselli sono fornite dalla norma UNI 2718.

<b>B</b> <b>[cm]</b>	<b>A<sub>min</sub></b> <b>[cm]</b>	<b>A<sub>max</sub></b> <b>[cm]</b>	<b>H</b> <b>[cm]</b>
32	48	65	15 o 18
35	52	70	15 o 18
38	57	75	15 o 18
40	60	80	15 o 18
45	67	90	15 o 18
50	75	100	15 o 18

Si prenda in considerazione il seguente parametro R, il quale indica la superficie di giunto per superficie di pavimentazione :

$$R = (A+B) * s / [(A*B) + (A+B)*s] \text{ [cm}^2 \text{ di giunto/cm}^1 \text{ di pavim.]}$$

Dove:

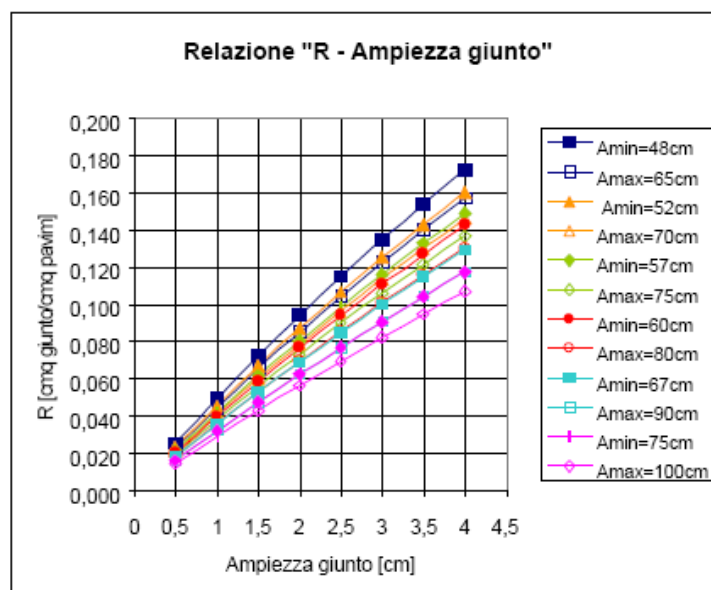
A = lunghezza del massello;

B = larghezza del massello;

H = le due altezze previste dalla norma;

s = ampiezza del giunto.

Essendo il parametro R funzione di tre variabili (A, B, s), è interessante verificare come il parametro varia al crescere dell'ampiezza del giunto. Ad ogni larghezza della base corrisponde una lunghezza minima ed una massima del massello, quindi si ottiene che per ogni ampiezza di giunto è stato calcolato R minimo ed R massimo [10].



**Fig. 3.33** – Relazione tra il parametro R e l’ampiezza dei giunti, in funzione della dimensione dei masselli.

Per determinare la quantità di resina necessaria a sigillare un giunto di una certa ampiezza, si sono sfruttati i risultati delle prove di percolazione eseguite in laboratorio. Si ricorda che le percolazioni sono state effettuate su due differenti tipi di sabbia, con differenti risultati.

La quantità di resina necessaria per sigillare un centimetro quadrato di pavimentazione, al variare dell’ampiezza del giunto, si ottiene moltiplicando il valore della quantità di resina occorrente, per centimetro quadrato di giunto, per il valore del parametro R [10].

$$Q_{ij}(\text{riferimento}) = R_i \times q_s \times H_{rif.}$$

Dove:

$Q_{ij}(\text{riferimento})$  = quantità di resina occorrente in funzione del tipo di sabbia, dell’ampiezza e dell’altezza del giunto per cm<sup>2</sup> di pavimentazione [gr / cm<sup>2</sup> di pavim.]

$R_i$  = valore del parametro R in funzione dell’ampiezza del giunto”i”

$q_s$  = peso della resina poliuretanica per unità di volume in funzione del tipo sabbia “s” [gr / cm<sup>3</sup> di giunto];

$H_{rif.}$  = altezza del giunto in funzione della relativa normativa [cm di giunto];

---

Dalle prove effettuate si evince che la quantità di resina occorrente, a parità di larghezza del giunto, è maggiore nella sabbia tipo “Poli”, la quale effettivamente ha una maggiore percentuale di vuoti [10].

Le numerose prove di laboratorio eseguite insieme ai riscontri derivanti dalle applicazioni sperimentali effettuate anch’esse nell’ambito della presente ricerca, hanno dimostrato una certa difficoltà nel contemplare le contestuali esigenze di avere un prodotto dalle elevate caratteristiche elastiche e dalla veloce presa (necessaria per riaprire rapidamente la strada al traffico) [10].

Ciononostante si è riusciti a mettere a punto una specifica formulazione che massimizza i risultati attesi; nel contempo è risultato necessario utilizzare sabbia di granulometrica piuttosto fine ed uniforme, che dà luogo ad una buona adesione intergranulare e ad un insieme complessivamente poco friabile.

Le prove di percolazione hanno però evidenziato che la resina, avendo una velocità di percolazione elevata ed iniziando a reticolare circa due ore dopo la messa in opera, raggiunge anche lo strato d’allettamento.

Per evitare uno spreco di materiale, la quantità di liquido da versare deve essere preventivamente calcolata in base alle dimensioni dei masselli ed all’ampiezza dei giunti [10].

Un fattore a sfavore di questo metodo di sigillatura è rappresentato dalla necessità di disporre, affinché avvenga il processo di presa, di sabbia completamente priva d’umidità e ciò può rappresentare una limitazione in fase di posa in opera. La ricerca è orientata alla verifica comportamentale di una resina poliuretanica bi-componente la quale, attraverso le prove in sito ed in laboratorio già eseguite (alcune di esse specificamente messe a punto), ha mostrato particolare attitudine a soddisfare, con elevate prestazioni, i requisiti necessari per l’applicazione nei giunti di pavimentazioni a masselli, anche per fini strutturali e non solo funzionali[10].

---

## CAPITOLO IV

### ***CENSIMENTO DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE PRESENTI A NAPOLI E PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DEGRADI DELLE PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO ED IN CUBETTI***

#### **4.1. GENERALITA'**

Il monitoraggio continuo della sovrastruttura è indispensabile per poter pianificare gli interventi di manutenzione. Diventa così necessaria la creazione di una banca dati contenente tutte le informazioni che, derivanti dal monitoraggio, siano idonee a caratterizzare nel tempo le proprietà funzionali e strutturali della pavimentazione stessa.

Un primo passo verso la realizzazione di un'adeguata banca dati è costituito dalla pianificazione della Campagna di prove, operazione che ha richiesto la realizzazione di un Censimento delle pavimentazioni stradali presenti a Napoli, per identificare sul territorio la localizzazione delle diverse tipologie di pavimentazioni.

La necessità di dover disporre di un'adeguata banca dati ai fini della manutenzione e della gestione delle pavimentazioni stradali in ambito urbano può motivare l'iniziativa di costituire un Censimento delle stesse. In particolare, in tale contesto, significa acquisire informazioni sulla tipologia di pavimentazione delle infrastrutture stradali esaminate.

La classifica tipologica ha riguardato le pavimentazioni stradali presenti nelle municipalità della corona centrale del Comune di Napoli, che comprende i seguenti quartieri: Pendino, S. Lorenzo, Vicaria, Porto, S. Giuseppe, Montecalvario, S. Ferdinando, Chiaia, Vomero, Posillipo, Arenella (in parte), Avvocata, Stella, S. Carlo Arena (in parte).

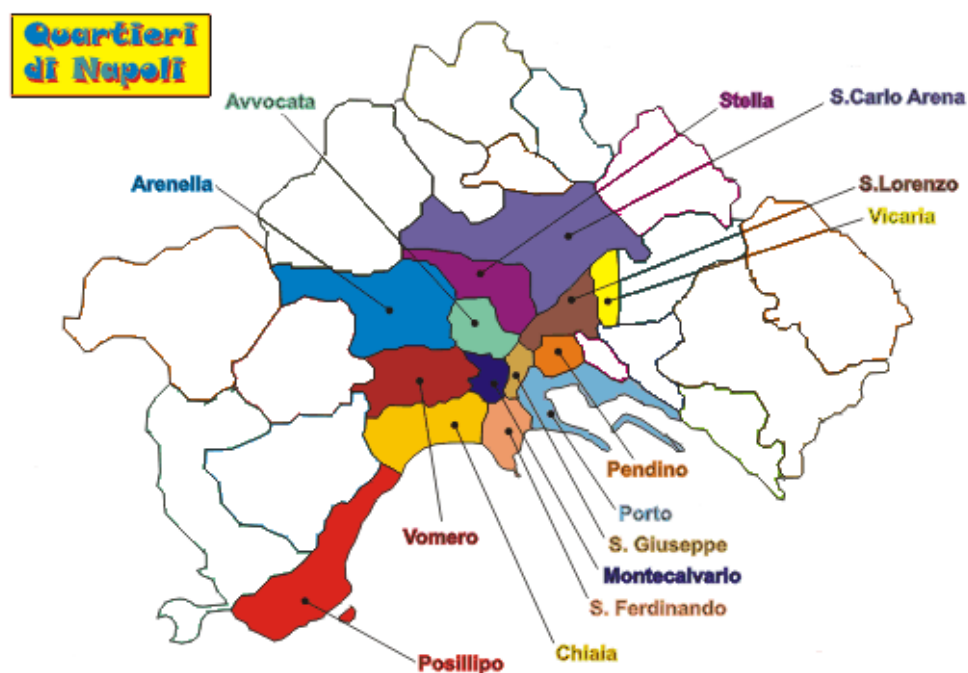


Fig 4.1 – Mappatura quartieri esaminati

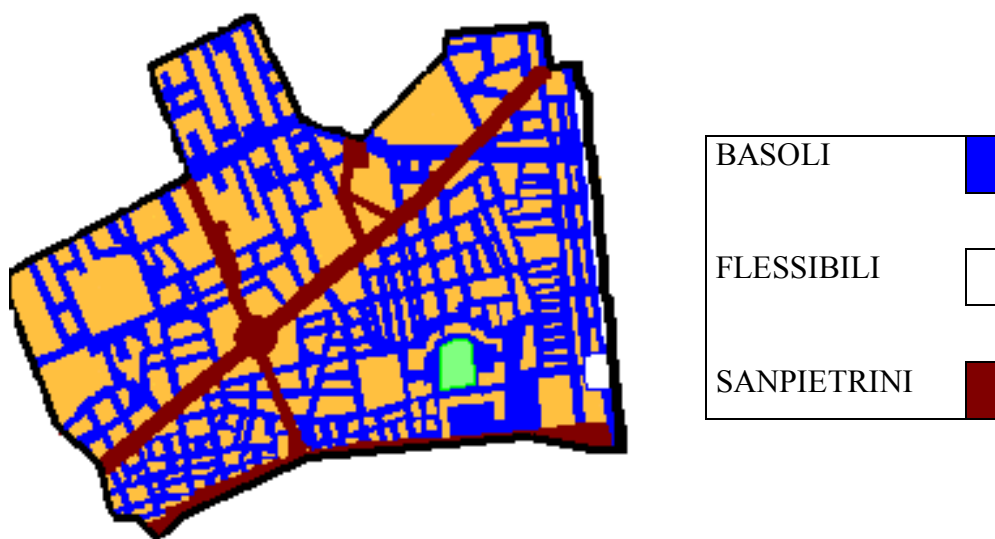
La classificazione è stata realizzata mediante osservazione visiva, che ha consentito anche di creare un database contenente oltre alle denominazioni delle diverse strade esaminate e la tipologia della corrispondente pavimentazione anche lo stato di degrado e la presenza di eventuali punti singolari/critici mediante l'integrazione di una opportuna documentazione fotografica.

Si forniscono di seguito le mappe topologiche dei diversi quartieri esaminati.

## 4.2. CENSIMENTO PAVIMENTAZIONI LAPIDEE NAPOLETANE QUARTIERE PER QUARTIERE

### Quartiere Pendino.

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.

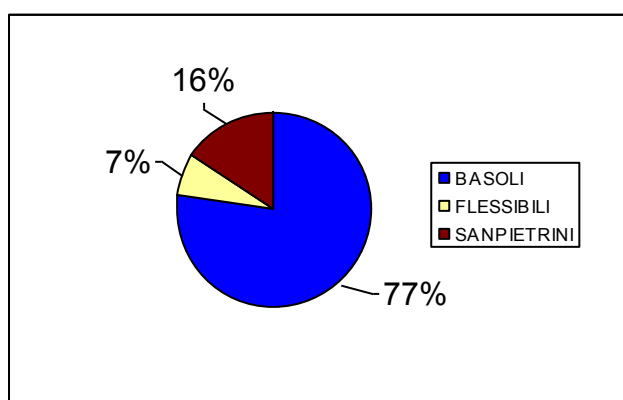


**Fig 4.2 – Mappa topologica**

Si riporta di seguito la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali.

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via Saverio Baldacchini	Basoli
Via Campagnari	Basoli
Via T. Campanella	Flessibile
Via Arnaldo Cantina	Basoli
Via Ernesto Capocci	Basoli
Via Carminiello Ai Mannesi	Basoli
Via Carminiello Al Mercato	Basoli
Via Antonio Ciccone	Basoli
Via Pietro Colletta	Sanpietrini
Via Del Grande Archivio	Basoli
Via Guido Dorso	Basoli
Via Duca Di S. Donato	Basoli
Via Duomo	Sanpietrini
Via Egiziaca A Forcella	Basoli
Via Marramarra	Basoli
Via Miroballo Al Pendino	Basoli
Via Nolona	Basoli
Via Giovanni Paladino	Basoli
Via Ferdinando Palasciano	Sanpietrini

Via Francesca Pignatelli	Sanpietrini
Via S. Arcangelo A Baiano	Basoli
Via Seggio Del Popolo	Basoli
Via S. Giovanni Corte	Basoli
Via Padre Francesco Desta	Basoli
Via Padre Luigi Tosti	Basoli
Via Renovella	Basoli
Via Silvio Spaventa	Basoli
Via Antonio Tari	Basoli
Via Vicaria Vecchia	Basoli
Corso Giuseppe Garibaldi	Basoli/Asfalto
Corso Umberto I	Sanpietrini
Vico Barrettari	Basoli
Vico Dei Panettieri	Basoli
Vico Li Carminiello Ai Mannesi	Basoli
Vico Grande	Basoli
Vico Monte Della Pietà	Basoli
Vico Nuovo Ai Librai	Basoli
Vico Pappardelle Al Pendino	Basoli
Vico S. Guido	Basoli
Vico San Severino	Basoli
Piazza Crocelle Ai Mannesi	Sanpietrini
Piazzetta Divino Amore	Sanpietrini
Piazza Nicola Amore	Flessibile



**Fig 4.3** – Distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni.

Esempio di pavimentazione realizzata in sampietrini. Si noti il degrado della pavimentazione: asportazione del giunto.





**Fig 4.4** – Pavimentazione in cubetti: Corso Umberto 1, Napoli.

Esempio di pavimentazione in basoli.

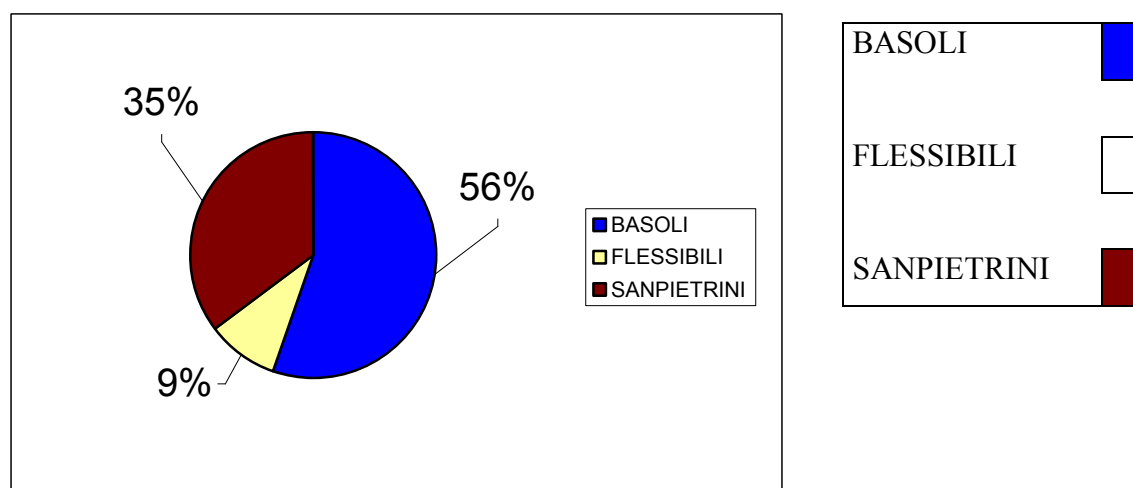


**Fig 4.4** – Pavimentazione in lastricato: Corso Garibaldi, Napoli.

---

**Quartieri Avvocata, Montecalvario, S. Giuseppe, Porto.**

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.



**Fig 4.5** – Mappa topologica e distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni.

Si riporta di seguito la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali.

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via S. Aspreno	Basoli
Via Avvocata	Basoli
Via Caronale Guglielmo Sanfelice	Sanpietrini
Via Francesco Saverio Carrera	Sanpietrini
Via Domenico Capitelli	Basoli
Via Giulio Cesare Cortese	Basoli
Via Cisterna Dell'olio	Sanpietrini
Via Conte Olivares	Basoli
Via Cristoforo Colombo	Sanpietrini/Asfalto/Basoli
Via Benedetto Croce	Basoli/Sanpietrini
Via D'andrea	Basoli
Via Dei Fiorentini	Snpietrini
Via Dei Pellegrini	Basoli
Via Dell'incoronata	Sanpietrini
Via Del Maio Di Porto	Basoli
Via Armando Diaz	Sanpietrini
Via Angelo Di Costanzo	Basoli
Via Lanzieri	Basoli
Via Maddaloni	Basoli
Via Marchese Campodisola	Sanpietrini
Via Giuseppe Marotta	Basoli
Via Medina	Flessibile
Via Guglielmo Melisurgo	Flessibile
Via Mezzocannone	Basoli
Via Monteoliveto	Sanpietrini
Via Luigi Palmieri	Basoli
Via Giuseppe Pisanelli	Sanpietrini
Via Porta Di Massa	Basoli
Via S. Anna Dei Lombardi	Sanpietrini/Asfalto
Via Santa Brigida	Sanpietrini
Via Santa Chiara	Basoli
Via S. Carlo	Asfalto/Sanpietrini
Via S. Giovanni Maggiore Pignatelli	Basoli
Via S. Nicola Alla Dogana	Basoli

---

Via S. Sebastiano	Basoli
Via Tarsia	Basoli
Via Toledo	Sanpietrini
Via Traversa Leone	Flessibile
Via Giuseppe Verdi	Flessibile
Via Vittorio Emanuele II	Flessibile
Via Raffaele Viviani	Basoli
Vico Bagnara	Basoli
Vico Camestrari	Basoli
Vico Carcere San Felice	Basoli
Vico Dei Banchi Dello Spirito Santo	Basoli
Vico Dei Costanzi	Basoli
Vico Della Quercia	Basoli
Vico Donnaromita	Basoli
Vico Mastellone	Basoli
Vico Medina	Basoli
Vico S. Geronimo	Basoli
Vico Santa Maria La Nova	Basoli
Via S. Tommaso D'aquina	Flessibile
Piazza Giovanni Bovio	Sanpietrini
Piazza Carolina	Sanpietrini
Piazza Dante	Sanpietrini
Piazza Del Plebiscito	Basoli/Sanpietrini
Piazza Gesù Nuovo	Sanpietrini
Piazza Municipio	Flessibile
Piazza S. Domenico Maggiore	Basoli
Piazza 7 Settembre	Sanpietrini
Piazza Trieste E Trento	Sanpietrini
Piazzetta Di Porto	Sanpietrini

---

Esempio di pavimentazione mista, che presenta un tratto in basoli ed un tratto in sampietrini.



**Fig 4.6** – Pavimentazione mista: Via Cristoforo Colombo, Napoli.

Esempio di pavimentazione flessibile.



**Fig 4.7** – Pavimentazione flessibile: Piazza Municipio, Napoli.

---

Esempio di pavimentazione in cubetti..



**Fig 4.8** – Pavimentazione in cubetti: Piazza del Plebiscito, Napoli.

Esempio di pavimentazione che presenta un tratto flessibile ed un tratto in cubetti.



**Fig 4.9** – Via San Carlo, Napoli.

Esempio di pavimentazione in basoli.

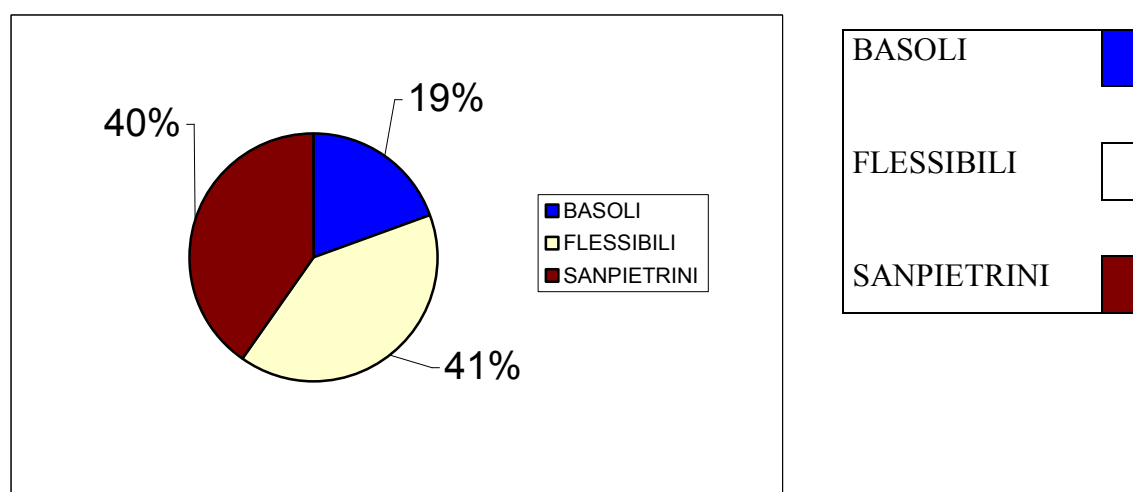
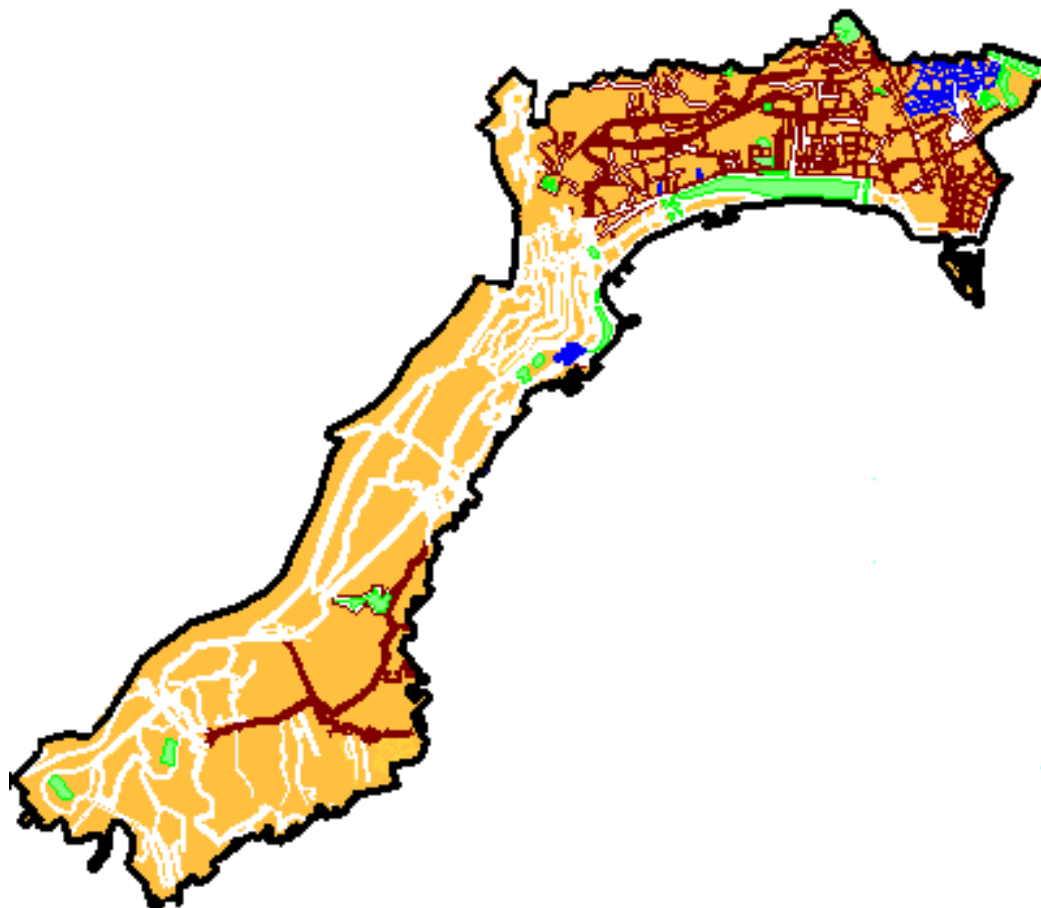


**Fig 4.10** – Pavimentazione in lastricato: Via Di Costanza, Napoli



### Quartieri Chiaia, S. Ferdinando, Posillipo.

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.



**Fig 4.11** – Mappa topologica e distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni.

---

Per la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali, si rimanda all'Appendice B.

Esempio di paviementazione in cubetti con materiale misto: profido-lava leucitica.

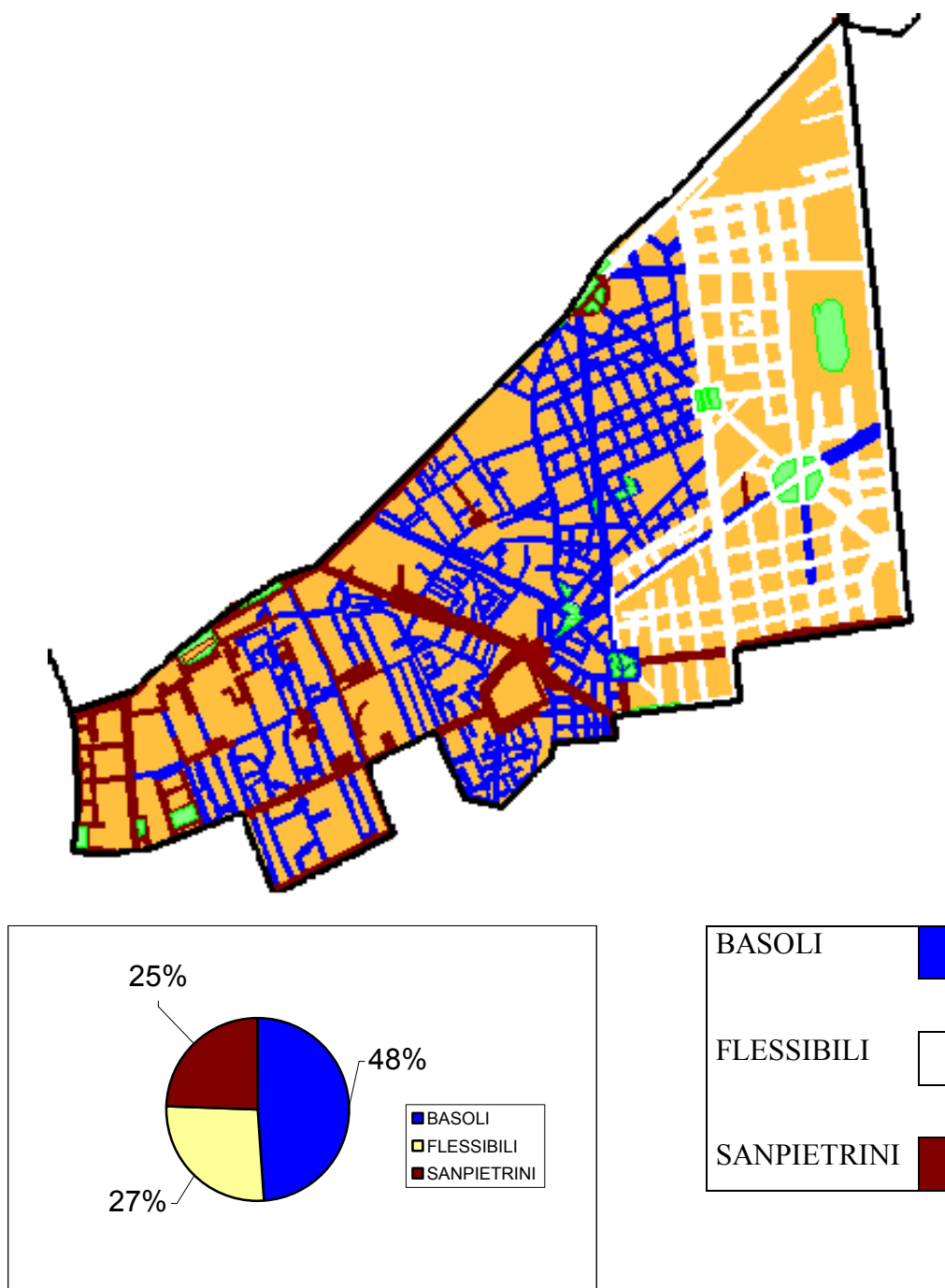


**Fig 4.12** – Pavimentazione mista in cubetti di porfido – cubetti in lava leucitica: via Marina, Napoli



### Quartieri S. Lorenzo, Vicaria.

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.

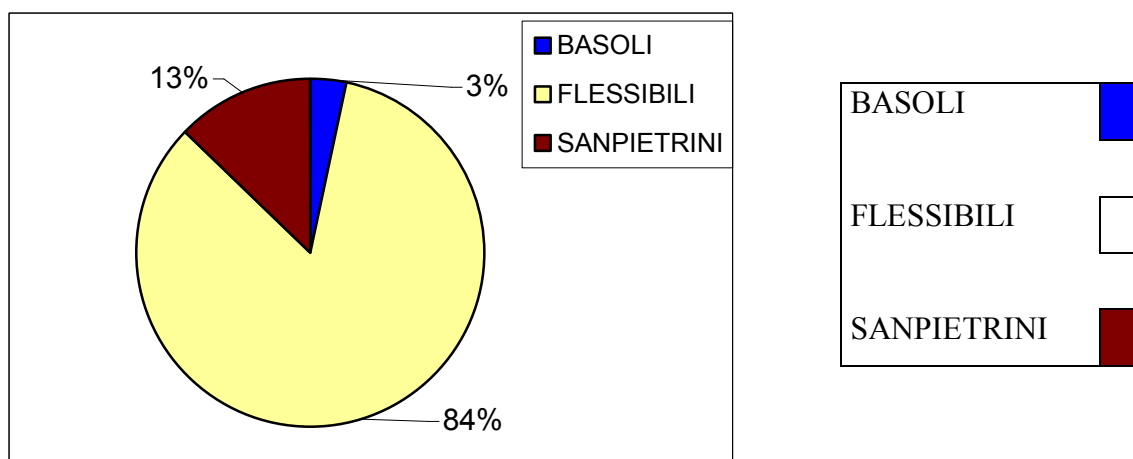
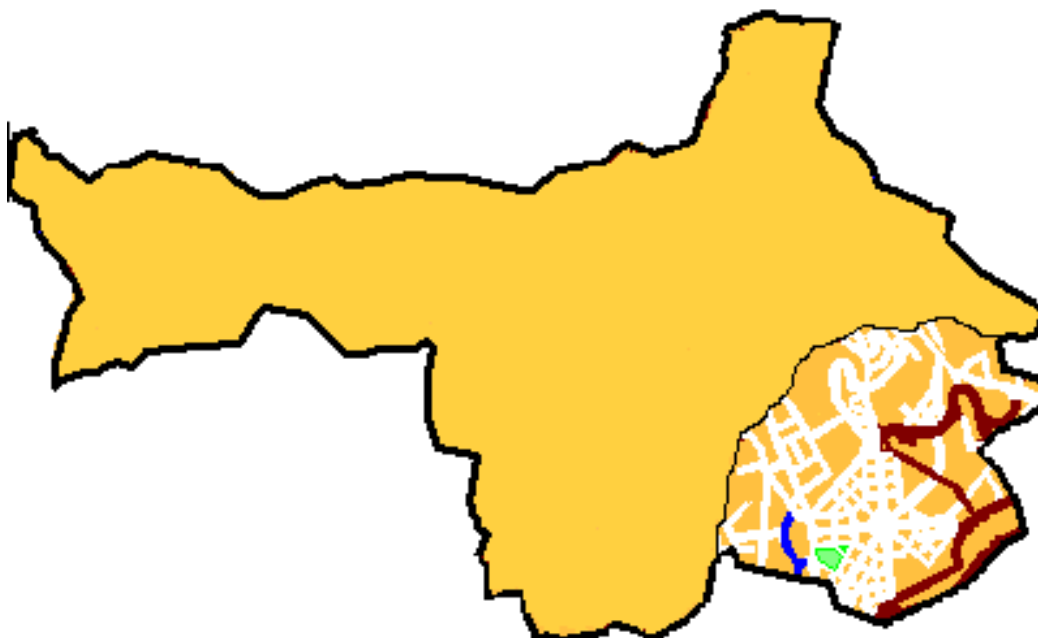


**Fig 4.13** – Mappa topologica e distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni.

Per la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali, si rimanda all'Appendice B.

### Quartiere Arenella.

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.

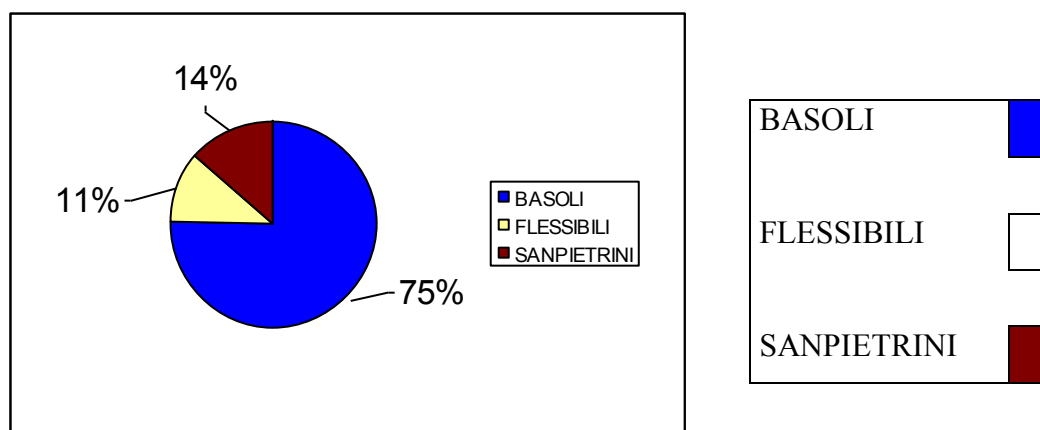
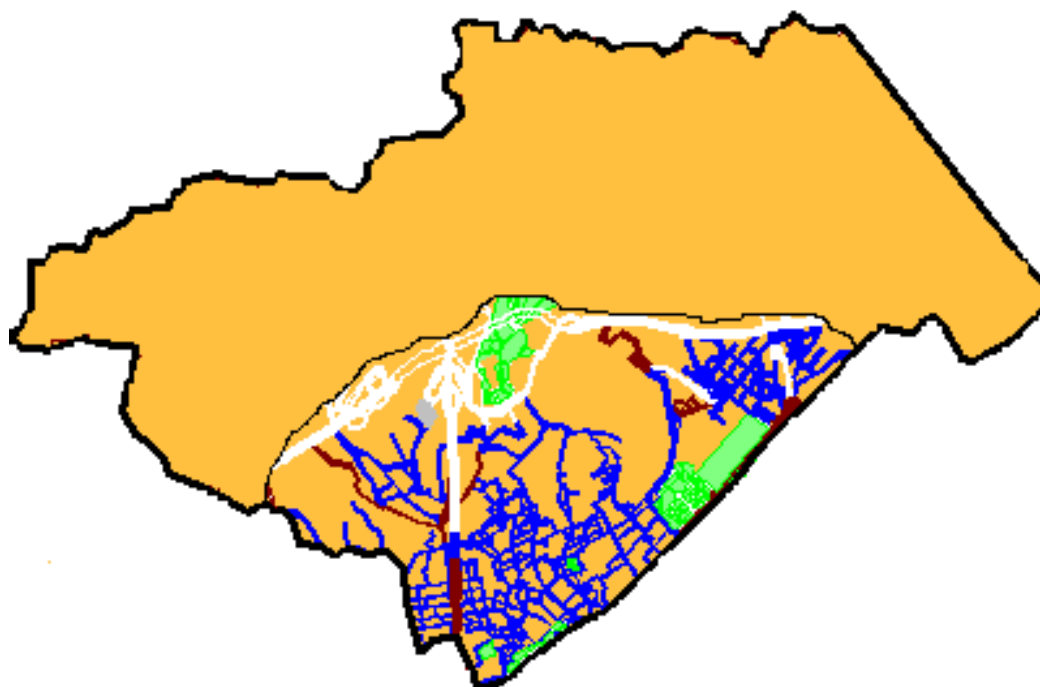


**Fig 4.14** – Mappa topologica e distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni

Per la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali, si rimanda all'Appendice B.

#### Quartieri Stella, S. Carlo all'Arena.

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.

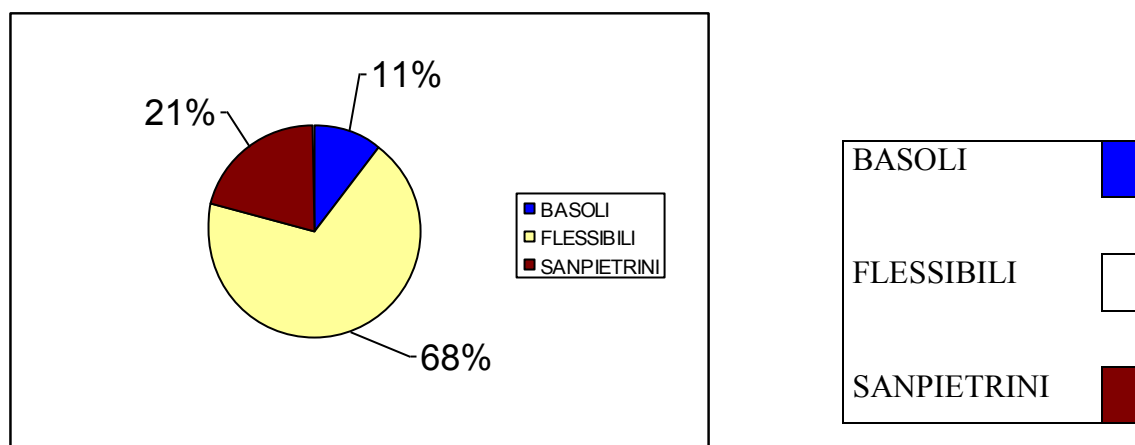
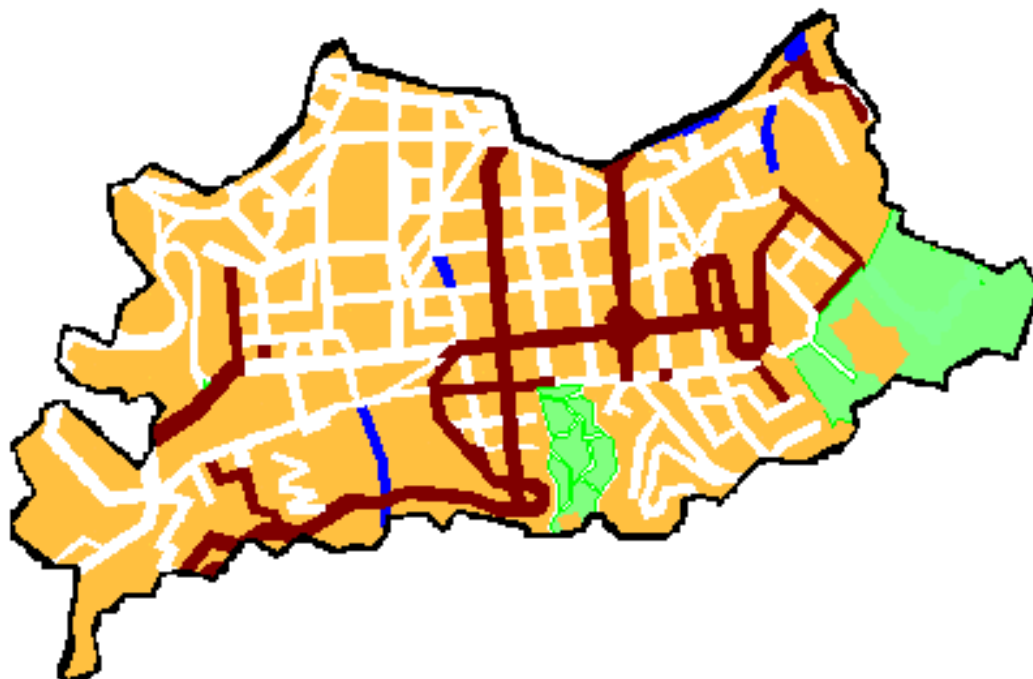


**Fig 4.15** – Mappa topologica e distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni

Per la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali, si rimanda all'Appendice B.

### Quartiere Vomero.

Nella seguente immagine sono riportate in blu le pavimentazioni stradali costituite da basoli, in bianco quelle flessibili ed in rosso quelle costituite da sampietrini.



**Fig 4.16** – Mappa topologica e distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni

Per la tabella contenente le denominazioni delle strade e le corrispondenti tipologie di pavimentazioni stradali, si rimanda all'Appendice B.

## QUADRO D'INSIEME

Nel corso del censimento delle pavimentazioni della città di Napoli è stata realizzata una classifica tipologica mediante osservazione diretta delle stesse, che ha consentito di creare un database, contenente tanti fogli quanti sono il numero dei quartieri esaminati.

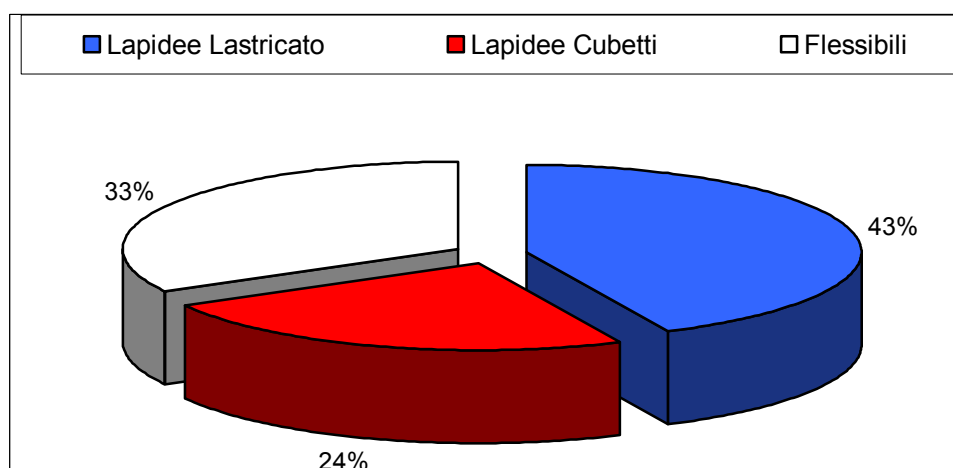
In ciascun foglio si sono riportate le denominazioni delle diverse strade osservate alle quali sono state associate la tipologia della corrispondente pavimentazione ed una documentazione fotografica della stessa, contenente anche lo stato della pavimentazione. Sulla base dei dati rilevati si sono realizzate delle mappe digitali tipologiche attribuendo un colore diverso ad ogni tipologia di pavimentazione.

Nella seguente tabella si riportano, per i vari quartieri, il numero delle pavimentazioni osservate, il numero delle pavimentazioni in basoli rilevate, il numero delle pavimentazioni flessibili rilevate, il numero delle pavimentazioni in cubetti rilevate e le relative percentuali:

QUARTIERI	n° pav.	n° pav. basoli	n° pav. flessibili	n° pav. sanpietrini	% basoli	% flessibili	% cubetti
Arenella	31	1	26	4	3.2	83.9	12.9
Avvocata, M.Calvario, Porto	65	36	6	23	55.4	9.2	35.4
Chiaia, S. Ferdinando, Posillipo	62	12	25	25	19.4	40.3	40.3
Pendino	44	34	3	7	77.3	6.8	15.9
Stella, S.Carlo Arena	81	61	9	11	75.3	11.1	13.6
Vicaria, S.Loremzo	102	50	27	25	49	26.5	24.5
Vomero	95	10	65	20	10.5	68.4	21.1

**Tabella 1** – Sintesi censimento pavimentazioni di Napoli

Nel complesso sono state esaminate le pavimentazioni di 475 strade di Napoli. Di queste il 43% sono costituite da basoli, il 33% sono flessibili ed il 24% sono costituite da pavimentazioni in cubetti; si evidenzia che le pavimentazioni lapidee incidono in ragione del 70% circa sulla viabilità complessiva analizzata



**Fig 4.17** – Quadro d'insieme della distribuzione percentuale delle diverse tipologie di pavimentazioni per tutte le strade esaminate.

Essendo le pavimentazioni in elementi lapidei quelle maggiormente diffuse tra quelle delle strade esaminate; si giustifica ulteriormente uno studio per approfondire il comportamento di tali sovrastrutture.

Tale esame ci ha permesso di classificare le pavimentazioni per tipo e quindi di poter localizzare le pavimentazioni lapidee di Napoli, di modo da creare una base sulla quale costruire la campagna di prove necessaria all'acquisizione dei dati di profilo, descritta nel capitolo successivo.

### **4.3. PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DISSESTI DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE**

Negli ultimi tempi si è letto più volte, nelle pagine dei quotidiani dedicate alla cronaca di Napoli, dei problemi infiniti e perennemente irrisolti che destano questo tipo di pavimentazioni, oltretutto sotto tutela dalle Soprintendenza per i Beni architettonici della Provincia di Napoli.

Tornando al problema delle strade, le pavimentazioni lapidee, di vario formato e dimensione, costituiscono un innegabile valore culturale ed un elemento di qualità architettonica particolarmente importante in prossimità degli edifici storici in una città il cui centro storico vanta il primato di essere Patrimonio mondiale dell'umanità protetto dall'Unesco.

Le pavimentazioni che rientrano nel perimetro del centro storico sono ampiamente consolidate nell'immagine che tradizionalmente si ha della città ed incidono in maniera

---

essenziale nella qualità degli spazi architettonici, costituendo un elemento complementare alle facciate degli edifici storici.

D'altro canto, sono sotto gli occhi di tutti i problemi che tali pavimentazioni arrecano alla viabilità, alla qualità di marcia ed agli edifici circostanti, in termini di comfort di marcia, di vibrazioni indotte all'ambiente esterno, ed ai continui disagi che comportano i cantieri che continuamente si aprono per il ripristino delle pavimentazioni.

Ciò premesso, appare quindi evidente che il problema delle pavimentazioni lapidee deve essere risolto con un approccio ingegneristico, analizzando e monitorando in maniera scientifica lo stato di "salute" di tali pavimentazioni, fornendo valutazioni ed indicatori di stato oggettivamente riconducibili alle prestazioni delle pavimentazioni, soprattutto nell'ottica del prossimo Global Service.

Quindi il primo passo di questa ricerca è stato incentrato sull'analisi dello stato attuale delle pavimentazioni lapidee esistenti a Napoli (tipologie, materiali utilizzati, caratteristiche superficiali, dissesti, stati dei giunti) attraverso rilievo visivo e strumentale, per poter poi giungere ad una classificazione delle stesse.

Dal censimento e dall'analisi visiva di tali pavimentazioni, è risultato evidente che se da un lato esse offrono il vantaggio di qualificare l'estetica delle strade e dei contesti urbani in cui sono adottate, dall'altro mostrano in molti casi caratteristiche funzionali non soddisfacenti sia per quanto concerne l'aderenza che la regolarità.

Si sono quindi passati in rassegna i dissesti più comuni di questo tipo di pavimentazioni, dal dentellamento al distacco della sigillatura dei giunti, proponendo un catalogo dei principali dissesti relativi sia alle pavimentazioni in lastricato che a quelle in selciato, correlandoli ai problemi più comuni che generano questo tipo di sovrastrutture, dalla riduzione del comfort di marcia dovuto all'irregolarità fino alle vibrazioni indotte dal traffico veicolare.

Si è quindi avanzata una proposta di catalogo dei degradi più comuni per le pavimentazioni lapidee, differenziandolo tra le pavimentazioni in lastricato e quelle in cubetti. Per la classificazione dei degradi si è fatto riferimento a quanto dettagliato nel corso del capitolo III.

### 4.3.1 PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DEGRADI DELLE PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO

#### Eccessiva Apertura Di Giunti Non Sigillati

I giunti risultano eccessivamente aperti.



##### Cause

L'eccessiva apertura dei giunti può essere dovuta ad una non corretta posa in opera o a spostamenti che nel tempo hanno interessato i masselli prevalentemente nell'ambito dello strato di allettamento. Il fenomeno può essere anche connesso a fenomeni di avvallamento o ormaiamento.

#### Asportazione Di Sigillante Dai Giunti

I giunti risultano privi, parzialmente o completamente, della sigillatura.

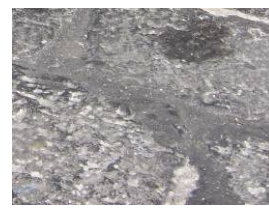


##### Cause

La mancanza di legante all'interno di un giunto può essere causata da:  
- profondità di penetrazione del legante inadeguata rispetto alla larghezza del giunto stesso;  
- materiale invecchiato e/o infragilito asportato dai veicoli;  
- bassa adesione tra sigillatura e parete del massello.

#### Spandimento Di Legante Sul Massello

Il legante invece di occupare la superficie del solo giunto occupa parzialmente anche quella del massello.



##### Cause

Il fenomeno è causato da una posa non corretta (eccesso di mastice sigillatura oltre gli spigoli del giunto) oppure da materiale non idoneo rispetto alle condizioni del traffico e della temperatura.

#### Spostamento Superficiale Dei Masselli: Dentellamento

La superficie si presenta sostanzialmente planare, ma vi sono irregolarità locali, con un effetto "dentellamento".



##### Cause

Lo spostamento dei masselli dalla loro posizione naturale è causato da un cattivo ammassamento degli stessi nello strato di allettamento e/o da una perdita dell'interlock (collaborazione con i masselli adiacenti).

#### Avvallamenti Della Superficie

Avvallamento della pavimentazione di forma approssimativamente circolare o ellittica.



##### Cause

L'avvallamento è spesso causato dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione localmente, o da cedimenti del sottofondo. I sovraccarichi dinamici esaltano ed accelerano l'evoluzione del dissesto.

#### Ormaiamento

Deformazione trasversale della pavimentazione lungo le traiettorie dei pneumatici.



##### Cause

L'ormaiamento è spesso causato dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione, o del sottofondo, la quale subisce delle deformazioni viscose permanenti dovute al traffico veicolare soprattutto se canalizzato.



### Abrasiono superficiale

La superficie degli elementi risulta essere eccessivamente liscia



#### Cause

L'usura superficiale dell' elemento lapideo è inevitabilmente dovuta dal passaggio dei veicoli. Il problema nasce quando la scabrezza superficiale non viene ripristinata da interventi di manutenzione quali bocciardatura o scalpellatura

### Buche e rappezzi

Elementi di discontinuità della pavimentazione, spesso rappezzati con Conglomerato Bituminoso.



#### Cause

Una volta che un giunto interelemento è saltato, si viene a creare un punto di debolezza nella pavimentazione. Al continuo passaggio dei carichi, interi elementi (per le pavimentazioni a cubetti) o parti di essi (per quelle in lastricato) si possono completamente staccare dal manto creando buche poi rappezzate.

### 4.3.2 PROPOSTA DI UN CATALOGO DEI DEGRADI DELLE PAVIMENTAZIONI IN CUBETTI

#### **Eccessiva Apertura Di Giunti Non Sigillati**

I giunti risultano eccessivamente aperti.



#### **Cause**

L'eccessiva apertura dei giunti può essere dovuta ad una non corretta posa in opera o a spostamenti che nel tempo hanno interessato i masselli prevalentemente nell'ambito dello strato di allettamento. Il fenomeno può essere anche connesso a fenomeni di avvallamento o ormaimento.

#### **Asportazione Di Sigillante Dai Giunti**

I giunti risultano privi, parzialmente o completamente, della sigillatura.



#### **Cause**

La mancanza di legante all'interno di un giunto può essere causata da:  
-profondità di penetrazione del legante inadeguata rispetto alla larghezza del giunto stesso ;  
-materiale invecchiato e /o infragilito asportato dai veicoli;  
-bassa adesione tra sigillatura e parete del massello

#### **Spandimento Di Legante Sul Massello**

Il legante invece di occupare la superficie del solo giunto occupa parzialmente anche quella del massello.



#### **Cause**

Il fenomeno è causato da una posa non corretta (eccesso di mastice sigillatura oltre gli spigoli del giunto) oppure da materiale non idoneo rispetto alle condizioni del traffico e della temperatura.

#### **Abrasiono superficiale**

La superficie degli elementi risulta essere eccessivamente liscia



#### **Cause**

L'usura superficiale dell'elemento lapideo è inevitabilmente dovuta dal passaggio dei veicoli. Il problema nasce quando la scabrezza superficiale non viene ripristinata da interventi di manutenzione quali bocciardatura o scalpellatura.



#### **Buche e rappezzi**

Elementi di discontinuità della pavimentazione, spesso rappezzati con Conglomerato Bituminoso.



#### **Cause**

Una volta che un giunto interelemento è saltato, si viene a creare un punto di debolezza nella pavimentazione. Al continuo passaggio dei carichi, interi elementi (per le pavimentazioni a cubetti) o parti di essi (per quelle in lastricato) si possono completamente staccare dal manto creando buche poi rappezzate.

<p><b>Avvallamenti Della Superficie</b></p> <p>Avvallamento della pavimentazione di forma approssimativamente circolare o ellittica.</p>  <p><b>Cause</b></p> <p>L'avvallamento è spesso causato dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione localmente, o da cedimenti del sottofondo. I sovraccarichi dinamici esaltano ed accelerano l'evoluzione del dissesto.</p>	<p><b>Ormaiamento</b></p> <p>Deformazione trasversale della pavimentazione lungo le traiettorie dei pneumatici.</p>  <p><b>Cause</b></p> <p>L'ormaiamento è spesso causato dalla non adeguatezza strutturale della pavimentazione, o del sottofondo, la quale subisce delle deformazioni viscosi permanenti dovute al traffico veicolare soprattutto se canalizzato.</p>
--	--

A valle di questo studio approfondito su queste tipologie di pavimentazioni, si è preso spunto, inoltre, per ulteriori considerazioni di seguito riportate:

- le pavimentazioni lapidee, ancorché connotate da una rilevante valenza estetica ed architettonica, rappresentano delle soluzioni tecnologiche che sebbene abbiano subito alcune migliorie nel corso degli anni, sono state concepite con riferimento ad un traffico che, per entità e spettro, era molto meno severo rispetto a quello che attualmente interessa la viabilità principale di una metropoli di medie dimensioni;
- nella pratica corrente, sembra permanere la percezione di una pavimentazione virtualmente “eterna” che necessita solo di cadenzate operazioni di regolarizzazione dello strato superficiale ogni qual volta il livello di irregolarità raggiunge soglie giudicate intollerabili, condizione che, con i volumi di traffico attuali, si presenta ormai con frequenza estremamente elevata;
- la presenza di capitolati non aggiornati in base alla evoluzione delle conoscenze scientifiche e tecnologiche che si sono avute negli ultimi decenni da un lato, e la scarsa sensibilità nell'effettuare efficaci controlli in corso d'opera sulla qualità dei materiali e delle tecniche adottate dall'altro, contribuisce a peggiorare le prestazioni di tali sovrastrutture sotto l'azione del traffico.

---

## CAPITOLO V

### *PROGRAMMAZIONE CAMPAGNA DI PROVE E COSTRUZIONE DATA BASE DI PROFILI*

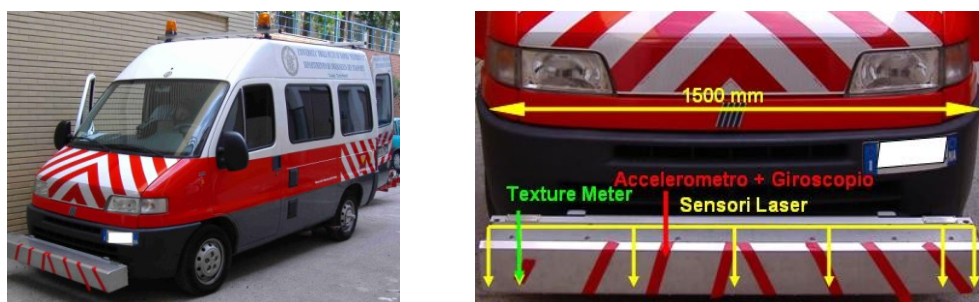
#### 5.1 DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA DI PROVE

Ai fini dell'implementazione del Modello, è operazione fondamentale il reperimento di una grossa mole di dati, riguardanti le diverse tipologie di pavimentazioni, in selciato ed in lastricato, e con diversi stati di conservazione.

Un primo passo verso la realizzazione di un'adeguata banca dati è costituito dalla pianificazione della Campagna di prove, operazione che ha preliminarmente richiesto la realizzazione di un Censimento delle pavimentazioni stradali presenti nel comune di Napoli, per identificare sul territorio la localizzazione delle diverse tipologie di pavimentazioni e la relativa consistenza.

Questa fase è stata ampiamente descritta nel precedente Capitolo IV.

L'acquisizione dei profili è stata effettuata mediante l'impiego di una attrezzatura ad alto rendimento di proprietà del Centro Regionale di Competenza Trasporti, e disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, e che verrà meglio descritta nel successivo paragrafo. In particolare l'apparecchiatura è composta da 7 sensori laser di tipo inerziale montati su di una barra posta anteriormente al veicolo di dimensioni pari a 1500 mm che consente il rilievo contemporaneo del profilo stradale secondo sette allineamenti longitudinali diversi (vedi figura 1).



**Fig 5.1** – Profilometro Laser impiegato nell'indagine.

Terminata la fase di mappatura delle pavimentazioni lapidee con conseguente individuazione dei siti di misura, si è potuta cominciare l'acquisizione dei profili con l'apparecchiatura ad alto rendimento.

Sono stati complessivamente rilevati i profili di numerose strade, dalle quali è stato possibile estrapolare 18 assi viari principali per una lunghezza totale di circa 35 km, corrispondenti a circa 240 km di profili longitudinali acquisiti.

	<b>ASSI VIARI PRINCIPALI</b>	<b>Tipo Pavimentazione</b>
1	C.so Amedeo di Savoia	flessibile
2	C.so Garibaldi	lastricato
3	C.so Umberto	selciato
4	C.so Vittorio Emanuele	selciato + flessibile
5	Riviera Chiaia	selciato
6	Corso Arnaldo Lucci	selciato
7	Via Caracciolo	flessibile
8	Via Cristoforo Colombo	lastricato
9	Via De Gasperi	lapidea
10	Via Foria	selciato
11	Via Chiatamone	lastricato
12	Via Giulio Cesare	flessibile
13	Via Marina	selciato
14	Via del Parco Margherita	selciato
15	Via Posillipo	flessibile
16	Via Santa Teresa	selciato
17	Viale Augusto	flessibile
18	Via dei Mille	selciato

**Tabella 1** - Lista dei principali assi viari oggetto della campagna di rilevamento dei profili

## **5.2 DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA IMPIEGATA PER L'ACQUISIZIONE DEI PROFILI**

Il Profilometro Laser della Greenwood Engineering, di proprietà del Centro Regionale di Competenza Trasporti e disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, è costituito da un insieme integrato di strumentazioni comprendenti 6 teste Laser con frequenza di campionamento di 16 kHz per la lettura del profilo, una testa Laser con frequenza di campionamento di 64 kHz per la lettura della macrotestitura (Texture Meter), un odometro, un GPS per la georeferenziazione dei dati e 3 software applicativi per l'effettuazione delle misure.

In particolare, con la post elaborazione dei dati immagazzinati è possibile calcolare i valori di IRI (International Roughness Index) in continuo per tronchi stradali lunghi fino a 20 km, determinare i valori dell'ormae, della pendenza longitudinale e trasversale, seguendone lo sviluppo lungo la progressiva, e valutare la macrotestitura calcolando l'MPD (Mean Profile Depth) lungo il profilo rilevato. E' inoltre possibile acquisire in contemporanea, per poi rielaborare, i profili dei 7 allineamenti longitudinali.



**Fig 5.2 – Barra Profilometrica**

Caratteristica Rilevata	Attrezzatura	Classe	Componenti	Frequenza di Campionamento	Larghezza di banda del segnale	Diametro Raggio
<b>Profilo Longitudinale</b>	Profilometro	Dispositivo di Classe 1 (ASTM E950)	7 Teste Laser Odometro Accelerometro Giroscopio Stazione GPS	16 KHz	2 KHz	1mm

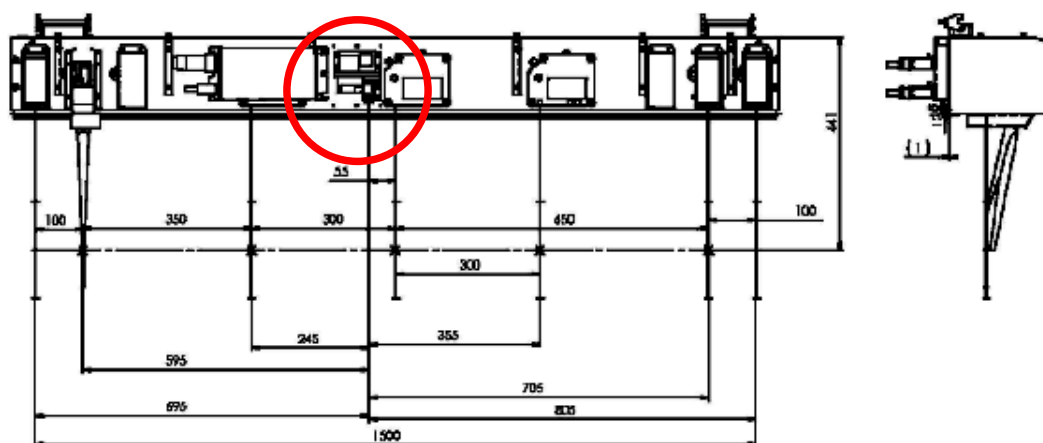
Risoluzione Verticale	Passo di campionamento min	Larghezza di banda del Profilo	Range di Misura	Intervallo Velocità Funzionamento	Ripetibilità a Profilo
0.05mm	< 5mm	8mm a 60km/h	±100mm	25 - 120 Km/h	±0.1mm

**Tabella 2 – Specifiche tecniche teste laser**



### Specifiche Attrezzatura per le misure di profili longitudinali:

- Consente una misura del profilo longitudinale della strada lungo due traiettorie “doppia *wheel path*” (distanza massime tra le traiettorie 1.5 m).
- Le caratteristiche del profilo misurato, al fine di consentire la corretta valutazione dell’indice IRI, sono congruenti con ciò che viene riportato sulla norma ASTM standard E 1364-95.
- Velocità di misura fra i 30 e i 110 Km/h.
- Profilometro di classe 1, con dispersione delle misure che rispetta la norma ASTM E-950.
- Il passo di campionamento minimo con cui si possono effettuare le misurazioni è  $< 5$  mm.



**Fig 5.3 – Accelerometro**

SPECIFICHE COMPONENTI PROFILOMETRO							
Strumento	Anti Shock	Temperatura di funzionamento	Temperatura di immagazzinamento	Accuratezza della Misura			
Accelerometro	100g; 11ms	-55°C - +95°C	-65°C - +95°C	Risoluzione	Larghezza di Banda	Errore lineare	Bias drift
				5 µg	150 Hz	<0.5 µg	< 20 µg per°C

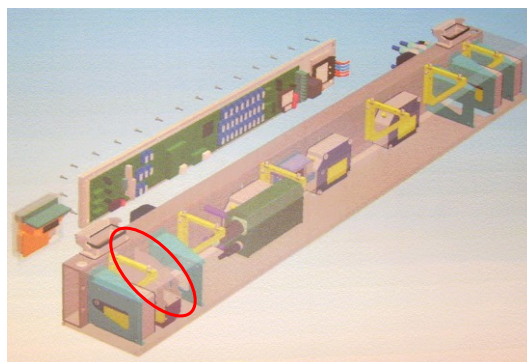
**Tabella 3 – Specifiche tecniche Accelerometro**



**Fig 5.4 – Odometro**

SPECIFICHE COMPONENTI PROFILOMETRO							
Strumento	Anti Shock	Temperatura di funzionamento	Temperatura di Immagazzinamento	Protezione Ambientale	Accuratezza della Misura		
<b>Odometro</b>	100g; 11ms	-20°C - +85°C	-30°C - +85°C	IP65	Risoluzione	Velocità max	Errore Rotazionale
					20000 pulsazioni per giro	300 km/h	<0.2 pulsazioni

**Tabella 4 – Specifiche tecniche Odometro.**



**Fig 5.5 – Texture Meter**

Caratteristica Rilevata	Attrezzatura	Classe	Componenti	Frequenza di Campionamento	Larghezza di banda del segnale	Diametro Raggio
<b>Macrotessitura</b>	Profilometro	Dispositivo di Classe 1 (ASTM E950)	1 Testa Laser Odometro Accelerometro Giroscopio Stazione GPS	64 KHz	20 KHz	0.45mm

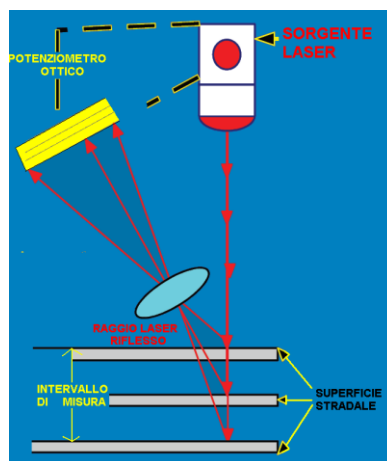
Risoluzione Verticale	Passo di campionamento min	Larghezza di banda del Profilo	Range di Misura	Intervallo Velocità Funzionamento	Ripetibilità MPD
0.015mm	<0,25mm	1mm a 72km/h	±32mm	25 - 120 Km/h	±0.1mm

**Tabella 4 – Specifiche tecniche Texture Meter**



Il principio del funzionamento del profilometro, si basa sulla misurazione dell'angolo di diffusione con il quale viene rimandato indietro il raggio Laser una volta colpita la superficie stradale.

Per tale motivo, le misure effettuate su superficie bagnata risultano essere falsate, in quanto non è possibile stabilire se la riflessione proviene dal fondo o dalla superficie del velo d'acqua. Quindi si possono effettuare misure su pavimentazione umida, ma non su superficie bagnata.



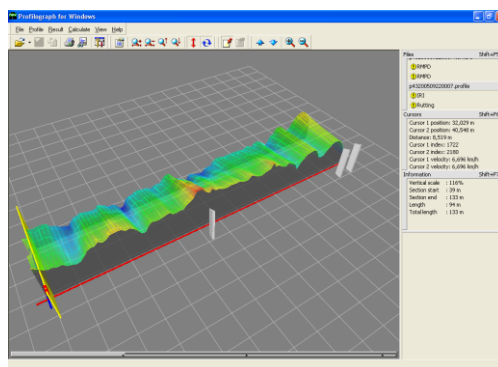
**Fig 5.6** – Principio di funzionamento del Profilometro Laser

La prima operazione da effettuare è la taratura delle sette testate Laser (procedura denominata Milk Calibration) e la taratura dell'odometro, da effettuarsi su una distanza nota in modo da poter verificare la corretta misurazione delle distanze.

Il software di acquisizione dati restituisce un file in formato binario per cui in post processing è necessario trattare con un ulteriore software il file di output di modo da ottenere due differenti file: uno con estensione .texture, da utilizzare ogni qual volta si vogliono effettuare elaborazioni sulla tessitura (come il calcolo dell'MPD) ed uno con estensione .profile, da utilizzare quando si vuole procedere con elaborazioni sul profilo rilevato.

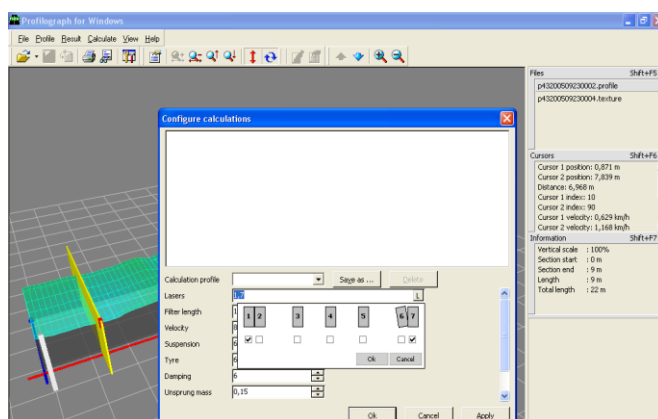
A questo punto è possibile trattare i file acquisiti con il software di elaborazione dati, il Profilograph for Windows.

Dal file .profile si può visualizzare il profilo longitudinale lungo i sette allineamenti corrispondenti la posizione dei laser, rendendo possibile il confronto del profilo così acquisito con quello rilevato da altre attrezzature di rilievo del profilo.



**Fig. 5.7** - Tipica restituzione grafica dei profili rilevati

Successivamente è possibile calcolare il valore di IRI (International Roughness Index) lungo uno o più profili longitudinali determinati in prossimità degli allineamenti dei Laser, scegliendo lungo quale allineamento calcolarlo ed i parametri del Quarter Car Model.



**Fig. 5.8** – Settaggio parametri per il calcolo dell'IRI

Alla fine delle elaborazioni è possibile esportare un file direttamente in formato Excel, o in formato testo, contenente i risultati delle operazioni effettuate.

Nel nostro caso si sono esportati i Files rispondenti ai profili grezzi (raw profile) che contengono solo la progressiva ed il valore di elevation per ogni punto.

Questi sono stati i file di input per tutte le successive elaborazioni.

---

### **5.3 PROBLEMATICHE NELLA MISURAZIONE DEI PROFILI E TRATTAZIONE PRELIMINARE DEI DATI**

Le operazioni di rilievo dei profili hanno presentato più problemi di quanti non ne fossero stati preventivati.

Il limite dell'apparecchiatura profilometrica è rappresentato dal fatto di non poter lavorare a velocità operative troppo basse, in quanto l'accelerometro per funzionare (e quindi per fornire il riferimento inerziale cui riferire le misure dei profili) necessita di una velocità minima di almeno 30 km/h.

Questa velocità risulta spesso non attingibile in ambito urbano, soprattutto a causa di fenomeni di congestione costantemente presenti sui principali assi viari napoletani (come quelli oggetto dello studio), ed a causa dei continui fenomeni di stop and go causati dai semafori rossi o da ostacoli imprevedibili (attraversamenti pedonali o motociclisti indisciplinati).

Al fine di ridurre i disturbi durante le misure, e conseguentemente per cercare di avere una velocità operativa durante le stesse costantemente maggiore di 30 km/h, la campagna di prove è stata effettuata interamente di notte, in una fascia oraria compresa tra le 24 e le 4 del mattino.

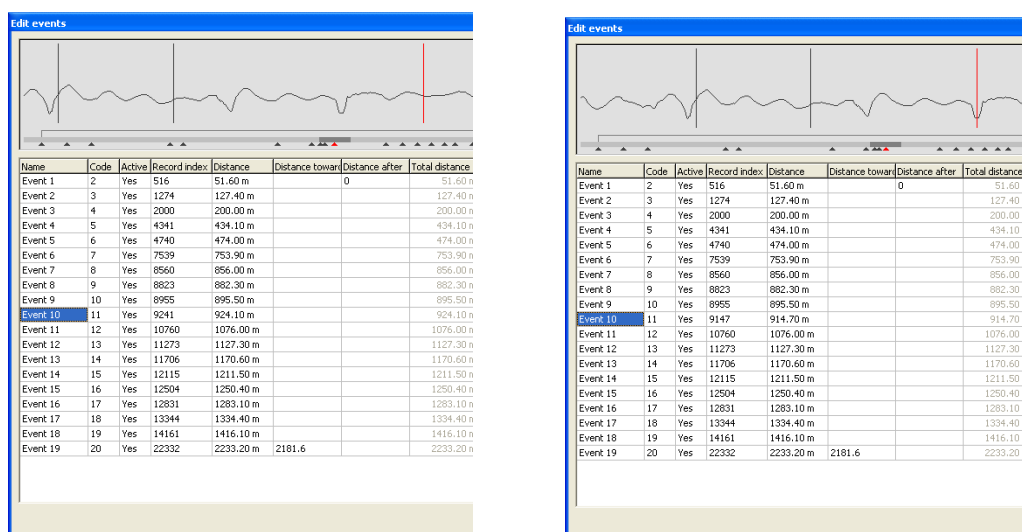
Altri gravi problemi che si sono incontrati nel corso della campagna di prove, sono stati quello della localizzazione delle irregolarità puntuali che si presentano durante l'acquisizione del profilo e quello di fronteggiare il grosso livello di vibrazioni trasferite all'interno del veicolo. Soprattutto sulle pavimentazioni lapidee altamente dissestate, come ad esempio quella presente in via Marina, il livello di vibrazioni trasferito all'interno dell'abitacolo del veicolo è tale da non permettere neanche di manovrare il PC portatile indispensabile per gestire le operazioni di acquisizione del profilo.

Questo problema ha avuto ricaduta soprattutto su quanto concerne la registrazione delle irregolarità puntuali.

Infatti, al fine di poter identificare lungo il profilo rilevato delle irregolarità puntuali quali buche e tombini, è necessario introdurre degli eventi durante l'acquisizione dei profili. Spesso però, quando le irregolarità si susseguono frequentemente, questa operazione appare particolarmente difficoltosa, anche perché viaggiando ad una velocità di almeno 30 km/h anche un solo secondo di ritardo nell'inserimento dell'evento comporta circa 10 m di errore nel posizionamento della irregolarità. Appare inoltre evidente come fosse assolutamente impossibile inserire nel software di acquisizione la tipologia di irregolarità evidenziata, al fine di poterne differenziare la tipologia.

Per risolvere il problema si è provveduto a registrare in un file audio, associato ad ogni profilo, tutti gli eventi/irregolarità incontrati nel corso della acquisizione del profilo; inoltre, facendo partire la registrazione del file audio in contemporanea rispetto al file di acquisizione del profilo, si è riuscito ad identificare le singole irregolarità con sufficiente precisione; richiedendo però operazioni di post processing particolarmente onerose in termini di tempo.

Successivamente, a causa dei grossi errori di posizionamento delle irregolarità comportati dai ritardi nell'inserimento delle irregolarità nel software, è stato necessario, sempre in post processing, una verifica del posizionamento delle irregolarità lungo tutti i profili, in modo da poterle eventualmente spostare là dove l'irregolarità fosse localizzabile precisamente da un esame visivo del profilo (come ad esempio accade nel caso delle buche o del cambio della tipologia della pavimentazione) appesantendo, però, ancor di più la fase di post processing preliminare alla elaborazione dei dati.



**Fig. 5.9** - Software Profilograph for windows: posizionamento dell'evento n°10 (in rosso), corrispondente ad una buca. Come mostra la figura c'è un errore evidente nella localizzazione dell'evento a), che ha reso necessaria una correzione con relativo riposizionamento dell'evento, b)

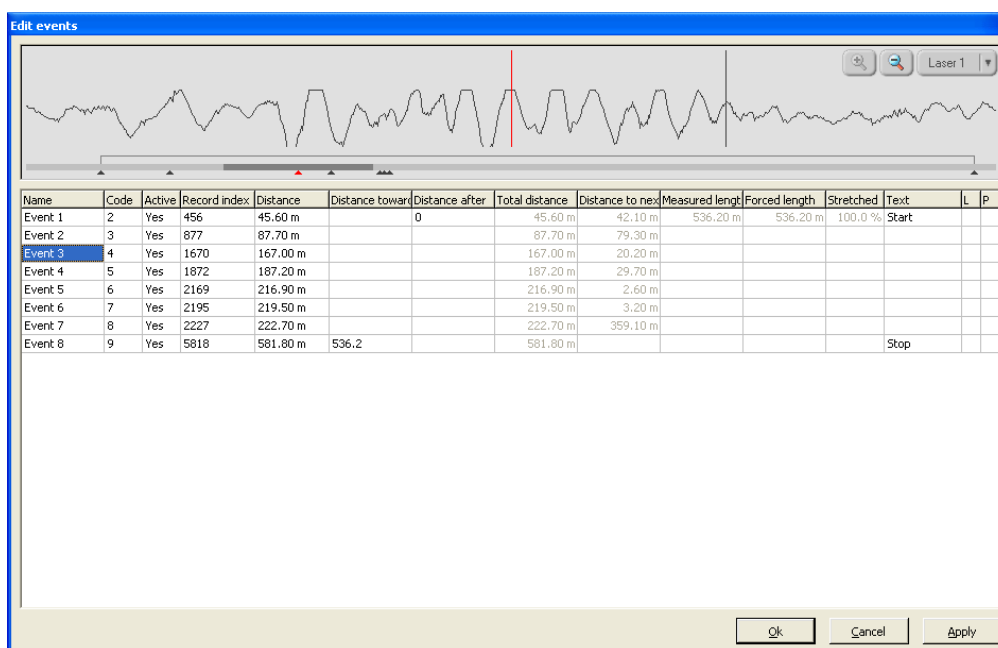
Quindi, le problematiche relative alle operazioni di rilievo, con le relative soluzioni, sono andate a formare un vero e proprio protocollo di prova in ambito urbano:

- velocità minima operativa dell'apparecchiatura profilometrica risulta essere di 30 Km/h: tale velocità non è spesso raggiungibile in ambito urbano soprattutto a causa dei frequenti fenomeni di congestione che si manifestano sui principali assi viari, quali quelli oggetti dello studio, ed a causa dei continui fenomeni di

- 
- stop and go causati dalla presenza di sistemi di controllo semaforico o da ostacoli e situazioni imprevedibili; pertanto, al fine di ridurre i disturbi durante le misure, la campagna di prove è stata effettuata interamente di notte, in una fascia oraria compresa tra le 24 e le 4 del mattino;
- difficile localizzazione delle irregolarità puntuali in relazione alla loro elevata frequenza: la presenza di irregolarità e/o punti singolari quali chiusini, rappezzi, giunti etc. può essere annotata elettronicamente nel file di acquisizione durante le operazioni di misura, l'elevata frequenza con cui tali irregolarità si presentavano, non compatibile con le più basse velocità operative, accompagnata dalla scarsa visibilità ha reso la individuazione di tali elementi particolarmente ardua; si è pertanto reso necessario dotarsi di un dispositivo di registrazione vocale per l'acquisizione di un file audio avendo cura di avviare la registrazione audio in contemporanea rispetto al file di acquisizione del profilo; la rielaborazione dei file forniti dal programma di acquisizione insieme con le informazioni sincronizzate nei file audio ha consentito di identificare le singole irregolarità con sufficiente precisione, richiedendo però operazioni di post processing particolarmente onerose in termini di tempo;
  - presenza in alcuni tratti di pavimentazioni estremamente ammalorati e tali da pregiudicare la qualità di percorrenza e la funzionalità dell'acquisizione anche in corrispondenza delle più basse velocità operative dell'apparecchiatura di misura: questa problematica ha reso necessario un riposizionamento di alcune irregolarità puntuali acquisite contestualmente al profilo, gravando ulteriormente sulle operazioni di post processing preliminari alla caratterizzazione dei profili.

L'acquisizione dei profili è stata effettuata impostando la lunghezza di campionamento minima prevista nelle specifiche dell'apparecchiatura (1 cm). La restituzione digitalizzata del profilo è stata però ottenuta selezionando di volta in volta un passo di campionamento compatibile con le dimensioni caratteristiche degli elementi lapidei costituenti la superficie stradale. Secondo quanto correntemente suggerito nell'analisi dei segnali (teorema di Nyquist), si è pertanto scelto un passo di campionamento pari alla metà della dimensione caratteristica degli elementi lapidei superficiali.

Resta aperta la questione su un ultimo problema operativo che si verifica in fase di acquisizione dati, e che si è dovuto fronteggiare prima di passare alla caratterizzazione dei profili, del quale ci si è accorti solo con l'inizio della elaborazione dei dati. Su pavimentazioni particolarmente irregolari, quali appunto quelle lapidee, spesso capita che il profilo esca al di fuori dell'intervallo di lettura del profilometro (+2; -18) causando così una perdita di segnale che si presenta, in quei tratti, costante. In sostanza, irregolarità eccessive non vengono lette dal profilometro, che non essendo in grado di fornire il profilo in questi tratti, restituisce una linea retta tra gli ultimi due punti buoni acquisiti.



**Fig. 5.10** - Tipica perdita di segnale che si registra su pavimentazioni particolarmente irregolari Esempio via Marina, Napoli

Di questa problematica, e di una possibile metodologia di risoluzione, si parlerà approfonditamente nel successivo Capitolo VI.

---

## CAPITOLO VI

### *ELABORAZIONE ED ANALISI DEI PROFILI RILEVATI*

#### **6.1 PREMESSA**

La gestione della manutenzione delle pavimentazioni stradali in ambito extraurbano è oggetto di ricerca da diversi anni, ed esistono oramai procedure consolidate accreditate da molti studi presenti nella letteratura tecnica.

Lo stesso non può purtroppo dirsi per l'ambiente urbano, dove la manutenzione delle sovrastrutture avviene spesso "a chiamata", esulando da veri e propri piani di gestione, anche a causa della difficile "misurabilità oggettiva" delle caratteristiche funzionali in tali contesti.

La gestione della manutenzione in ambito urbano presenta, per certi versi, aspetti di maggiore complessità rispetto a quella in ambito extra-urbano. La rete viaria principale che opera quasi sempre a capacità rendendo difficile la pianificazione e l'esecuzione degli interventi stradali, l'elevato numero di recettori sensibili presenti in prossimità dell'infrastruttura, la notevole diversificazione delle tipologie di sovrastrutture e quindi delle relative problematiche, costituiscono fattori di forte vincolo nella gestione del patrimonio stradale, che, al giorno d'oggi, viene affrontata molto spesso in un regime di risorse sempre più limitate. Se si considera inoltre l'elevata incidentalità che si manifesta in ambito urbano (nella quale la condizione della rete viaria riveste un peso non marginale) e la crescente e legittima richiesta da parte degli utenti di infrastrutture caratterizzate da più elevati standard di qualità, si può ben comprendere come il problema non può essere affrontato in maniera superficiale ma richiede notevoli livelli di approfondimento tecnico e metodologico.

Di recente, però, la accresciuta conoscenza del problema assieme ad una necessità di economia ed efficienza ha richiesto la messa a punto di sistemi di gestione pensati per l'ambito urbano e non solo adattati ad esso.

In tale ambito, si è incentrata l'attenzione nei confronti della regolarità delle superfici stradali che, come è noto, può condizionare sensibilmente l'interazione dinamica tra veicolo ed il profilo stradale, per quanto riguarda il comfort di marcia, la generazione dei sovraccarichi dinamici e, non ultime, le forze tangenziali di aderenza scambiate tra

---

pneumatico e pavimentazione. In ambito urbano, per l'elevata densità di recettori sensibili adiacenti alla rete viaria, si pone anche il problema della generazione delle vibrazioni indotte dal traffico veicolare per le quali la regolarità riveste un ruolo predominante. La misura ed il controllo di tale caratteristica superficiale rappresenta quindi un aspetto cruciale nella gestione della manutenzione delle pavimentazioni che però sembra non aver trovato sufficienti spazi di approfondimento nella letteratura tecnica.

Nei moderni Sistemi di Gestione della Manutenzione delle pavimentazioni, l'irregolarità, viene di norma espressa attraverso parametri descrittivi sintetici quali l'IRI, che ben si presta ad essere adoperato nelle procedure di supporto alle decisioni per la programmazione degli interventi di manutenzione. L'evoluzione di tale grandezza è infatti messa in relazione, tramite opportuni modelli di degrado di concezione prevalentemente empirica, con le prestazioni delle sovrastrutture e con le azioni prodotte dal traffico nel corso del tempo.

Va inoltre ricordato, che la diminuzione di regolarità del profilo stradale, produce un incremento dei costi di esercizio sostenuti dagli utenti (Vehicle Operating Costs), in termini di consumo di carburante, usura dei pneumatici, dei veicoli, etc., che assieme ai costi legati alla sicurezza, sostenuti dalla collettività, ed a quelli sostenuti dall'Ente Gestore, rappresentano le variabili che vanno opportunamente minimizzate nella procedura di ottimizzazione che controlla l'allocazione delle risorse per la programmazione degli interventi di manutenzione.

E' opportuno rilevare, inoltre, che in ambito urbano l'impiego di pavimentazioni ad elementi lapidei è ancora largamente diffuso, soprattutto nei centri storici. Si è potuto constatare però che questa tipologia di sovrastruttura è soggetta, più di altre, a sviluppare elevati livelli di irregolarità della superficie stradale. Occorre anche sottolineare che non esistono molti dati in letteratura sulla caratterizzazione del profilo di queste sovrastrutture né tanto meno sui meccanismi di evoluzione dell'irregolarità per effetto del passaggio dei veicoli.

Si può pertanto affermare che per le pavimentazioni in elementi lapidei presenti in ambito urbano si dovrebbero, più opportunamente, prevedere parametri di stato diversi od ulteriori rispetto a quelli correntemente utilizzati per le sovrastrutture flessibili, in quanto non risulta agevole "trasferire" ad esso strumenti e metodi propri dei PMS che, è bene sottolineare, sono stati sviluppati prevalentemente in ambito extraurbano.



---

Infatti la maggior parte dei parametri descrittivi sintetici, quali l'IRI od il Ride Number che sono correntemente adoperati nei sistemi di gestione della manutenzione delle pavimentazioni sono infatti stati sviluppati nell'ambito extraurbano. Inoltre, le più recenti tecniche di misura ad alto rendimento che si avvalgono dell'impiego di profilometri laser, sono state progettate per operare a velocità molto spesso superiori a quelle che possono essere attinte in un ambiente metropolitano.

Basti, ad esempio, pensare alle difficoltà intrinseche legate alla raccolta dati in relazione alle più basse velocità operative ed ai frequenti fenomeni di congestione che interessano la maggior parte delle arterie cittadine per buona parte della giornata.

Quindi entrambe le classi di dispositivi correntemente utilizzati per l'acquisizione dei profili stradali, le apparecchiature statiche e quelle dinamiche, presentano problematiche che rendono oltremodo difficoltosa l'operazione di misurazione della regolarità in ambito urbano. Infatti per le apparecchiature a basso rendimento si pone il problema della chiusura al traffico dei tronchi stradali investigati e di avere un importante supporto logistico alla campagna di misure da parte delle Amministrazioni locali (vedi presenza di vigili, ecc).

Per quanto concerne invece le apparecchiature ad alto rendimento, esse necessitano di lavorare a velocità operative al di sotto delle quali non restituiscono un dato valido, questo rappresenta un problema serio in ambito urbano, caratterizzato da velocità di crociera spesso troppo basse e da continui stop and go nella marcia.

Infatti, se queste attrezzature sono studiate per operare in ambito extraurbano senza entrare in conflitto con il flusso veicolare, lo stesso non può dirsi per le strade urbane.

Per quanto concerne questa problematica, è già stato fornito nel precedente Capitolo V un utile protocollo di prova, con annessa procedura di trattazione preliminare dei dati, finalizzata all'applicazione in ambito urbano di apparecchiature ad alto rendimento per la misurazione dei profili, che consenta di pervenire a dati soddisfacenti.

Analoghi problemi si riscontrano sulle metodologie e sui protocolli delle prove, infatti essendo le stesse pensate per l'ambito extra-urbano le diverse tipologie di materiali che si incontrano in ambito urbano (vedi pavimentazioni in elementi lapidei) suggeriscono un ripensamento delle prove stesse e, soprattutto, delle metodologie di trattamento dei dati acquisiti.

Da quanto è stato possibile constatare, possiamo quindi evincere che si avverte la necessità:

- 
- di sviluppare modelli e metodi per approfondire il comportamento di sovrastrutture lapidee sotto le azioni trasmesse dal traffico, al fine di comprendere come tale comportamento possa condizionare l'evoluzione delle caratteristiche superficiali ed in particolare della irregolarità;
  - di sviluppare metodologie di misura a basso costo che consentano comunque una adeguata restituzione dei parametri di stato utili ai fini della implementazione di un Sistema di Gestione della Manutenzione in ambito urbano; nonché di valutare l'applicabilità in ambito urbano di quelle apparecchiature ad alto rendimento che sono morfologicamente compatibili con tali contesti, apportando le opportune modifiche alle metodologie di prova e di elaborazioni dei dati rilevati.

In tale contesto, si è avviata una ricerca tesa ad approfondire le problematiche legate alla misura ed alla caratterizzazione della irregolarità delle pavimentazioni lapidee con l'obiettivo di consentire una adeguata implementazione di queste sovrastrutture nei Sistemi di Gestione della Manutenzione delle pavimentazioni urbane.

## **6.2 MODELLO DESCRITTIVO/INTERPRETATIVO DELLA REGOLARITA' DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE**

Con l'avvento dei dispositivi di misura ad elevato rendimento si è posto il problema di gestire in maniera razionale la notevole mole di dati acquisiti lungo estesi allineamenti viari. Per i profili longitudinali delle pavimentazioni stradali urbane tale aspetto risulta particolarmente critico in relazione al passo di campionamento adottato che può essere, come precedentemente rilevato, anche sensibilmente minore di quelli convenzionalmente impiegati in ambito extraurbano.

Obiettivo generale del Modello che si è messo a punto, è quello di pervenire ad una procedura che permetta di caratterizzare, compiutamente, i profili stradali in ambito urbano, costruendo così un modello evoluto di rappresentazione della regolarità.

In quest'ottica, il primo passo da compiere è sicuramente quello di estendere al caso di pavimentazioni lapidee i modelli già consolidati per le pavimentazioni flessibili che consentono la valutazione della regolarità superficiale grazie all'analisi spettrale del profilo rilevato, attraverso la funzione PSD (Power Spectral Density Function, ISO

---

8608), provvedendo alla validazione delle ipotesi che ne sono alla base, in particolare quella di stazionarietà ed ergodicità del processo stocastico cui è riconducibile il profilo longitudinale acquisito (che ne rappresenta, appunto, una funzione campione).

Infatti, ai fini della implementazione di un Sistema di Gestione delle Pavimentazioni, occorre che le caratteristiche spettrali e statistiche dei profili rilevati siano quanto più “stabili” possibile lungo la progressiva, al fine di poter associare un unico valore di un idoneo parametro descrittivo sintetico come ad esempio l’IRI. Tale requisito viene accertato verificando la cosiddetta stazionarietà del profilo che insieme alla ergodicità rappresenta una proprietà che ne consente la rappresentazione stocastica mediante la funzione di Densità Spettrale di Potenza (PSD) della elevazione verticale.

Purtroppo i profili misurati quasi mai possono essere assimilati a processi aleatori stazionari ed ergodici ma possono essere ricondotti a tali modelli se si riesce ad estrarre le componenti di tipo “transiente” relative alle cosiddette irregolarità localizzate applicando successivamente opportuni algoritmi di segmentazione per la individuazione di tratte omogenee.

Infatti, nel trattare i profili rilevati su pavimentazioni lapidee si sono spesso utilizzati gli strumenti già disponibili in letteratura, senza verificare se essi fossero effettivamente applicabili al campo delle pavimentazioni in pietra, e con quali limitazioni.

Il profilo longitudinale della pavimentazione, in effetti, può essere visto come sovrapposizione di una componente transiente legata alla presenza di irregolarità localizzate e di una componente che può essere scomposta in una successione di tratte stazionarie. Pertanto il profilo digitalizzato deve essere depurato dalle suddette irregolarità concentrate e successivamente ridotto in una serie di tratte stazionarie

Quindi, una volta acquisito il profilo, si è provveduto ad individuare gli step necessari alla sua caratterizzazione, proponendo una originale procedura di analisi dei profili che consente di estrarre la componente legata alle irregolarità localizzate e di individuare una successione ottimale di tratte stazionarie.

1. Eliminazione dei transienti.
2. Divisione dei profili in tratte stazionarie.
3. Verifica ipotesi di stazionarietà.

Prima di cominciare con l’implementazione del Modello, si è però dovuto fronteggiare un problema che si verifica in fase di acquisizione dati, e del quale ci si è accorti solo con l’inizio della elaborazione dei dati. Su pavimentazioni particolarmente irregolari,

---

quali appunto quelle lapidee, spesso capita che il profilo esca al di fuori dell'intervallo di lettura del profilometro (+2; -18) causando così una perdita di segnale che si presenta, in quei tratti, costante; causando quindi un “fuori scala” dello strumento di misura.

Più avanti, nel paragrafo 6.5, si illustra una procedura con la quale si è cercato di stimare, in qualche misura, la porzione di profilo persa a causa dell'interruzione del segnale, ma in prima battuta si è ritenuto opportuno lavorare su profili indisturbati, cioè su quelle porzioni di profilo non interessate dalla perdita di segnale.

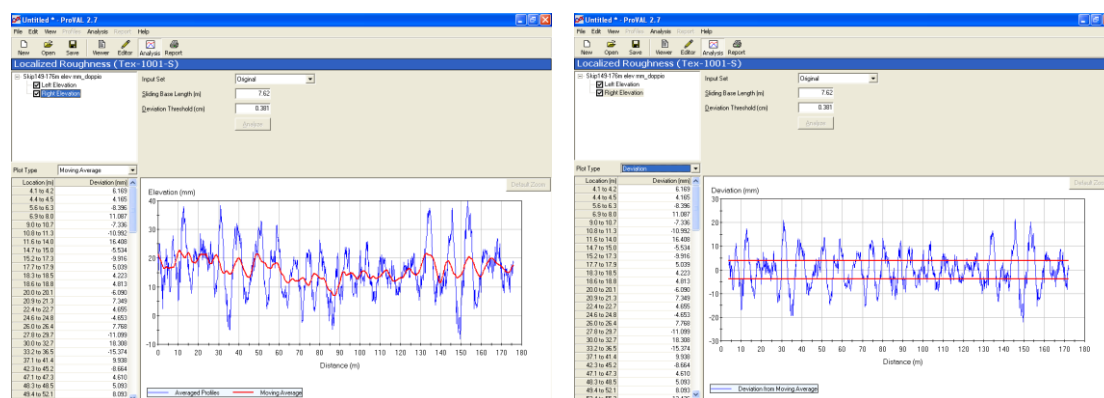
Questo vincolo ha però comportato il fatto di riuscire a lavorare solo su porzioni di profili di lunghezza non superiore a qualche centinaio di metri (al massimo 250m) onde evitare di incontrare tratti affetti dalla perdita di informazione.

### **6.2.1 ELIMINAZIONE DELLE IRREGOLARITA' PUNTUALI**

La prima operazione, preliminare a tutte le altre, per arrivare alla caratterizzazione di un profilo, è quella dell'eliminazione dei “transienti”, ovvero di quelle irregolarità puntuali che si trovano sulla pavimentazione (quali buche, presenza di chiusini, avvallamenti, dossi, ecc) e che non sono quindi rappresentative della regolarità superficiale.

E' il caso, inoltre, di sottolineare che le pavimentazioni lapidee, sono maggiormente soggette a generare irregolarità puntuali di questo tipo, basti pensare al distacco anche di pochi elementi lapidei causato da un cattivo stato dei giunti interelemento, o al fenomeno del “dentellamento”.

La prima metodologia utilizzata per affrontare il problema della rimozione dei transienti, è stata una molto semplice che si basa sul confronto del profilo originale con un profilo “addolcito” ottenuto applicando un Filtro a media mobile (Moving Average) al profilo di partenza, e che classifica come irregolarità tutti quei tratti in cui la differenza tra i due supera, in valore assoluto, una certa soglia  $\Delta$ . Ovviamente, il metodo risente molto del valore associato alla soglia  $\Delta$ , il quale è sicuramente funzione del tipo di pavimentazione, assumendo un valore maggiore per le pavimentazioni lapidee (nel nostro caso si è fissato un  $\Delta = 1\text{cm}$ , correlando questo valore alla dimensione dei giunti, onde evitare che ogni giunto in non ottime condizioni venisse identificato come irregolarità). Questo metodo di ricerca delle irregolarità non ha fornito buoni risultati, presentando un numero di irregolarità eccessivo anche aumentando il valore di  $\Delta$ .



**Fig 6.1** - Prima procedura di individuazione delle irregolarità puntuale mediante il software ProVal

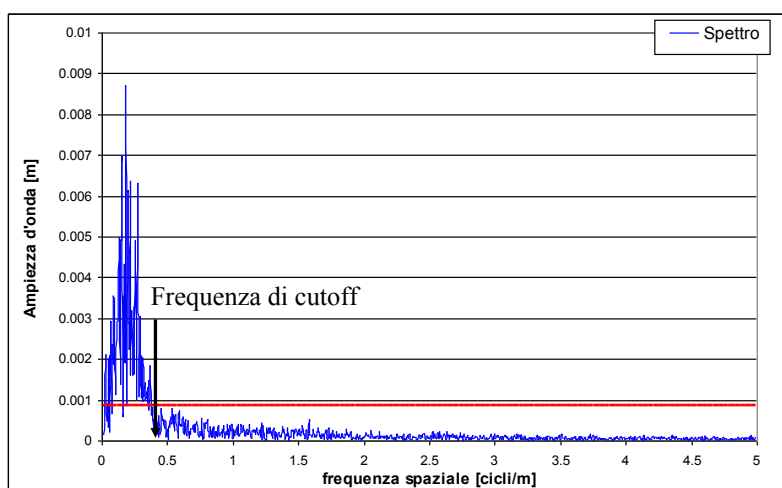
Per valutare i risultati di questo metodo di identificazione delle singolarità ci si è riferiti alle irregolarità certe inserite manualmente contestualmente all'acquisizione dei profili. Della metodologia di registrazione di queste irregolarità e della correzione nella locazione delle stesse si è già detto in precedenza (paragrafo sulla campagna di prove), tuttavia è opportuno ricordare che quando le irregolarità si susseguono rapidamente tra loro, è operativamente impossibile riportarle tutte sul file di acquisizione e si riesce solamente a segnalare la zona nella quale tali irregolarità si manifestano (il discorso è diverso, invece, per irregolarità isolate, che si riescono a segnalare con una discreta attendibilità). Per questo motivo è lecito aspettarsi dal modello un numero di irregolarità superiore rispetto a quelle fissate manualmente ma non in maniera eccessiva come invece accade. A titolo di esempio si riporta il caso di via Giulio Cesare, Napoli, in cui in un tratto di 400m a fronte di 8 irregolarità segnalate al momento della acquisizione del profilo, il modello restituisce 65 irregolarità, decisamente troppe; il risvolto positivo è però che tutte le irregolarità segnalate visivamente sono localizzate abbastanza precisamente dal modello.

Si è scelto quindi di applicare una metodologia diversa, e più complessa, basata sul confronto del profilo originale con uno modificato nel dominio delle frequenze ottenuto rimuovendo il contenuto spettrale che si trova al di sopra di una certa frequenza fissata, denominata cutoff frequency.

In particolare, l'algoritmo proposto per la individuazione dei transienti rappresenta un'evoluzione di quello descritto in (FERNANDO et al. 2005), dove, si ricorda, il profilo originario viene confrontato con un profilo addolcito (*smoothed*) ottenuto filtrando quello originario mediante un taglio del contenuto in frequenza superiore alla frequenza di cutoff. Quando la differenza tra i due profili supera una specifica soglia  $\Delta$ ,

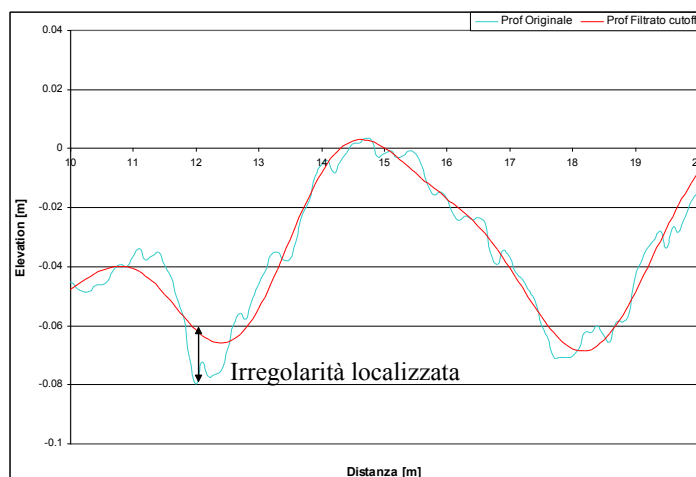
viene individuato il transiente che viene opportunamente rimosso. Occorre notare che nel lavoro di Fernando – che non era, in verità, esplicitamente rivolto alla riduzione in tratte stazionarie di un profilo stradale – si suggeriva di impiegare una frequenza di *cutoff* definitiva in funzione della funzione di guadagno dell'IRI. Anche tale scelta è sembrata troppo restrittiva a causa dell'elevato numero di irregolarità singolari localizzate sui profili acquisiti e pertanto, riconoscendo che l'irregolarità transiente si configura implicitamente come un processo a banda larga, è sembrato più opportuno definire la frequenza di *cutoff* come quella in corrispondenza della quale il contenuto spettrale scende al di sotto del 10 % di quello di picco

In sostanza, una volta determinato lo spettro del profilo si è scelto di rimuovere tutte le ampiezze d'onda relative alle frequenze al di sopra di quella in corrispondenza della quale le ampiezze si mantengono costantemente al disotto di un valore di soglia pari ad 1/10 di quello di picco. Tale frequenza limite è stata appunto definita cutoff frequency.



**Fig. 6.2** - Individuazione della frequenza di cutoff

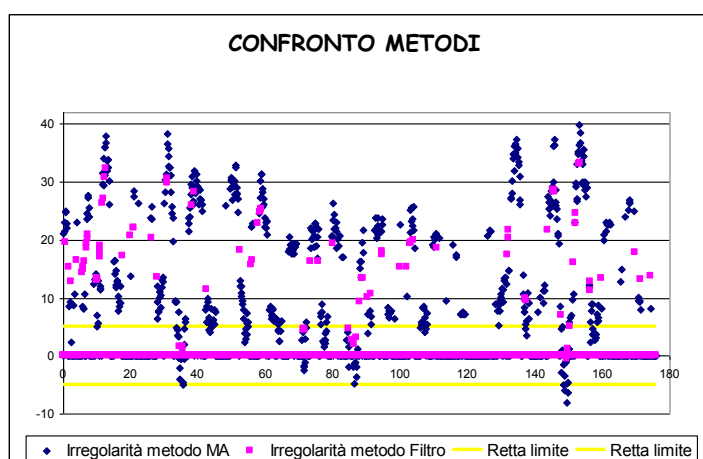
Così facendo, definito il nuovo contenuto spettrale “ridimensionato”, è possibile generare artificialmente il profilo ad esso corrispondente (come anti Trasformata di Fourier dello spettro di ampiezze così composto). Come si potrà verificare dalla figura seguente, il profilo artificiale così generato risulta essere addolcito, smussato, rispetto a quello di partenza; confrontando poi questo due profili è possibile pervenire alla localizzazione delle irregolarità puntuali.



**Fig. 6.3** – Confronto tra profilo originale e quello addolcito, e relativa individuazione delle irregolarità puntuali.

Il metodo risulta comunque estremamente sensibile al valore di differenza massima ammissibile,  $\Delta_{max}$ , aumentando considerevolmente il numero di irregolarità singolari individuate al diminuire di tale valore di soglia. Si è pertanto preliminarmente assunto un valore che permettesse di restituire un numero di irregolarità pari a quello mediamente osservato sulle tratte oggetto di studio

Dalla successiva analisi dei risultati, per le pavimentazioni lapidee pare che il  $\Delta$  ottimo cui fare riferimento possa ritenersi compreso in un intervallo tra i 5mm ed i 15 mm. In particolare un  $\Delta$  pari ad 1 cm ha fornito buoni risultati se si vanno a confrontare i numeri di irregolarità restituite da questo metodo con quelle risultanti dal primo metodo precedentemente esposto, basato sulla media mobile.



**Fig. 6.4** - Confronto tra il numero di irregolarità puntuali fornite da metodo basato sulla MA e quelle restituite dal metodo basato sulla generazione artificiale di un profilo addolcito.

---

Si è osservato che il numero di irregolarità puntuali fornite da questo metodo basato sulla generazione artificiale di un profilo addolcito, risulta essere intermedio tra quello restituito dal metodo basato sulla media mobile (troppi) e quello osservato visivamente (troppo pochi, a causa della fallibilità dell'operatore). Con riferimento all'esempio già esposto di via Giulio Cesare, si sono registrati 14 irregolarità risultanti da questa nuova metodologia di ricerca dei punti di singolarità, a fronte dei 65 provenienti dalla metodologia basata sulla media mobile e degli 8 del rilievo visivo contestuale all'acquisizione del profilo.

Ulteriore conferma dell'affidabilità di questo criterio per la ricerca delle irregolarità puntuali la si ottiene se si applica tale metodologia a tratti di profilo che già risultano essere stazionari. Infatti in tali circostanze il modello, utilizzando un  $\Delta$  pari ad 1 cm, non individua nessuna irregolarità puntuale, coerentemente con quanto ci si attenderebbe in una tratta stazionaria.

## **6.2.2 INDIVIDUAZIONE DELLE TRATTE OMOGENEE E VERIFICA DI STAZIONARIETA'**

Dopo che le irregolarità puntuali sono state eliminate, ai fini dell'individuazione delle sezioni di analisi, è lecito aspettarsi che in un profilo così modificato si possano identificare tratte nelle quali il processo aleatorio assimilato possa ritenersi stazionario.

L'idea è quella di applicare alla ricerca delle tratte stazionarie quelle metodologie già impiegate per la determinazione delle tratte omogenee utilizzate nei Sistemi di Gestione della Manutenzione delle pavimentazioni stradali.

Quindi, per quanto riguarda la individuazione delle tratte omogenee si è impiegato il metodo dicotomico suggerito dal Laboratoire Central des Ponts et Chaussées che consiste nello scomporre la serie di dati, misurati con passo costante, iterativamente in un certo numero di sotto-serie stazionarie al loro interno, e tra le quali sussistano scarti tra i valori medi significativi. Ciò viene effettuato applicando iterativamente un criterio per verificare l'omogeneità dei dati all'interno di una sotto-serie ed un metodo di suddivisione in grado di individuare il punto in cui si verificano variazioni significative nella sequenza dei dati.

Il criterio per la verifica dell'omogeneità dei dati fa riferimento alla grandezza:



$$u = (1-r) \sqrt{\frac{n^2-1}{n-2}}, \quad \text{dove } r = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (x_{j+1} - x_j)^2}{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}$$

Tale grandezza, nell'ipotesi di omogeneità dei dati, è una variabile aleatoria Normale Standard (la numerosità deve essere  $>25$ ), pertanto detta  $u_\alpha$  il valore del percentile  $\alpha$  della variabile aleatoria Normale standard si ha che:

se  $u_\alpha \leq u \leq u_{1-\alpha}$  la sezione è omogenea,

se  $u \geq u_{1-\alpha}$  vi sono delle variazioni sistematiche lente o dei raggruppamenti anomali,

$u < u_\alpha$  vi sono delle fluttuazioni rapide nei dati, indicanti generalmente degli errori di misura.

Nelle relazioni precedentemente scritte  $\alpha$  rappresenta la probabilità di affermare a torto che l'indicatore  $u$  non appartiene ad una popolazione distribuita come una variabile aleatoria Normale Standard (probabilità di falso rifiuto). Nel caso in cui la serie di dati non sia omogenea, si pone il problema di individuare il punto di frontiera tra le due serie omogenee in essa eventualmente presenti; ciò viene perseguito con l'ausilio di un metodo dicotomico che utilizza le proprietà di composizione della varianza.

Se  $n$  è il numero totale delle misure effettuate e  $\bar{x}$  il valore medio definito :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j,$$

S la somma dei quadrati degli scarti dal valore medio

$$S = \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2,$$

allora  $S$  può essere decomposto in una somma di quattro termini in funzione delle medie dei valori misurati nelle due zone:

1° zona: composta da  $i$  punti di misura con  $1 \leq j \leq i$ , in cui la media dei valori è  $\bar{x}_1$

2° zona: composta da  $(n-i)$  punti di misura con  $i+1 \leq j \leq n$ , in cui la media dei valori è  $\bar{x}_2$

Essendo:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i x_j \quad \text{e} \quad \bar{x}_2 = \frac{1}{(n-i)} \sum_{j=i+1}^n x_j.$$

Pertanto risulta:

$$S = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2 + i \cdot (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (n-i) \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x})^2,$$

ponendo:

$$W = \sum_{j=1}^i (x_j - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=i+1}^n (x_j - \bar{x}_2)^2 \text{ e } B = i \cdot (\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (n-i) \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x})^2$$

si ha:  $S = B + W$

dove  $W$  rappresenta la somma dei quadrati degli scarti all'interno delle zone omogenee e  $B$  rappresenta la somma dei quadrati degli scarti tra le zone omogenee.

Pertanto essendo la grandezza  $S$  costante per una serie di misure, mentre le grandezze  $W$  e  $B$  variabili con  $j$ , il valore di  $j$  in cui si ha il massimo del rapporto  $B/W$  (massimo scarto quadratico tra le due serie e minimo scarto quadratico all'interno delle due sotto-serie) può essere considerato come frontiera tra due sotto-serie. Poiché  $W$  e  $B$  possono essere espressi attraverso le seguenti relazioni:

$$B = -\frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right)^2 + \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 + \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2$$

$$W = \sum_{j=1}^n x_j^2 - \frac{1}{i} \left( \sum_{j=1}^i x_j \right)^2 - \frac{1}{(n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n x_j \right)^2$$

Effettuando un cambiamento di origine in  $\bar{x}$  ed assumendo la nuova variabile  $y_j = x_j - \bar{x}$  le espressioni delle grandezze  $W$  e  $B$  in funzione della nuova variabile  $y_j$  risultano essere:

$$W = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{(n-i+i)}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2 - 2 \cdot \bar{x} \cdot \left( \sum_{j=1}^n y_j \right) = \sum_{j=1}^n y_j^2 - \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2$$

$$B = \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2 + 2 \cdot \bar{x} \cdot \sum_{j=1}^n y_j = \frac{n}{i \cdot (n-i)} \left( \sum_{j=i+1}^n y_j \right)^2$$

Per una fissata serie di dati misurati si può porre:

$$\sum_{j=1}^n y_j^2 = cte$$

$$g(i) = \frac{n}{i(n-i)} \left( \sum_{j=1}^i y_j \right)^2$$

Da cui si ha:  $W = cte - g(i)$  e  $B = g(i)$ .

Il rapporto B/W assume il valore massimo in corrispondenza del massimo della funzione  $g(i)$ , pertanto la frontiera tra le due serie omogenee corrisponde alla progressiva del punto di misura i-esimo per il quale  $g(i)$  è massima. I criteri appena descritti possono essere combinati in un algoritmo iterativo che consente l'individuazione delle sezioni omogenee all'interno delle misure rilevate su un tronco stradale.

L'algoritmo si sviluppa secondo le fasi di seguito illustrate:

- 1) si effettua il test di omogeneità sulla tratta su cui sono state effettuate le N misure, se è verificato essa costituisce un'unica sezione omogenea e si associano ad essa gli indicatori caratteristici (valore medio e varianza della grandezza misurata), in caso contrario si passa alla fase successiva;
- 2) se sono state individuate variazioni lente, o gruppi di dati anomali ( $u \geq u_{1-\alpha}$ ), viene applicato il criterio di suddivisione, si calcolano gli N valori della funzione:

$$g(k) = \frac{N}{k \cdot (N - k)} \left( \sum_{j=1}^k y_j \right)^2 \quad 1 \leq k \leq N-1$$

$$y_j = x_j - \bar{X}$$

dove:

$x_j$  è il valore dell'attributo misurato sperimentalmente in sito nel punto j-esimo,  $\bar{X}$  è il valore medio delle misure effettuate sull'intera serie di valori misurati.

La serie in esame viene suddivisa in due sotto-serie in base al break point individuato, che coincide con la progressiva della misura  $x_k$  a cui corrisponde il massimo della funzione  $g(k)$ . Indicando con k la posizione del massimo di  $g(k)$ , la prima tratta ottenuta risulta essere costituita da k misure, comprese tra la prima e la k-esima (il break point individuato), la seconda è invece costituita da (n-k) misure, comprese tra la misura k+1 e la misura n;

- 3) si applica il test di omogeneità alle due serie individuate nella fase precedente;

---

4a) le serie che soddisfano il criterio di omogeneità costituiscono serie omogenee, quindi si può procedere ad assegnargli i valori caratteristici dell'attributo in esse misurato (valore medio e varianza campionaria);

4b) per le tratte che non soddisfano il criterio di omogeneità si applica nuovamente la procedura di suddivisione illustrata nella fase 2), in cui si pone  $N = k$  per la prima tratta non omogenea e  $N = N - k + 1$  per la seconda tratta non omogenea. Si applica quindi il test di omogeneità alle ulteriori tratte individuate;

5) si procede fino a quando per tutte le sezioni individuate dalla suddivisione, tramite la ricerca del valore massimo di  $g(k)$ , è soddisfatto il criterio di omogeneità, o al limite fino a che le sezioni individuate non contengono un numero di misure  $< 25$ .

Il metodo dicotomico ha quindi il pregio di poter essere implementato in una procedura di calcolo in cui l'unico parametro arbitrario è costituito dalla probabilità di falso rifiuto  $\alpha$ , di chiaro significato; di contro presuppone serie di misure effettuate con passo costante; per tale motivo i dati raccolti con l'apparecchiatura ad alto rendimento si prestano molto bene all'applicazione di tale metodo, proprio per la natura dei dati stessi. In base a quanto suggerito in letteratura, l'individuazione tratte omogenee sui profili è maggiormente efficace se i metodi di sezionamento sono applicati alla radice del valore quadratico medio (Root Mean Square) della accelerazione spaziale del profilo calcolata su una finestra mobile. Nel nostro caso si è impiegata una finestra di 50 punti.

Anche in tal caso, occorre osservare che l'estensione delle tratte omogenee individuate con tale procedura risulta sensibilmente condizionata dal numero minimo di dati assunto per la individuazione di una tratta,  $N_{min}$ , aumentando il numero di tratte al diminuire del valore di  $N_{min}$ .

Una volta ottenuto un profilo privo di difetti puntuali, e suddiviso in tratte omogenee presumibilmente stazionarie, si può procedere alla verifica dell'effettiva stazionarietà delle singole sezioni, attraverso opportuni test da individuare nell'ambito delle scienze econometriche.

Infatti, le tratte omogenee così individuate non sono necessariamente stazionarie. La verifica di stazionarietà, viene infatti condotta sulla accelerazione spaziale del profilo (che ci consente di ottenere un segnale a valor medio nullo con un ridotto contenuto di armoniche di elevata lunghezza d'onda che meglio si avvicina alle condizioni di stazionarietà) mediante l'esecuzione di un test statistico Chi-quadro per la valutazione della bontà di adattamento (goodness-of-fit) rispetto ad una distribuzione normale.

---

Infatti, per quanto concerne il test di stazionarietà ci si è riferiti al principio secondo il quale la funzione densità di probabilità della accelerazione spaziale delle elevazioni del profilo, per un processo stazionario, si distribuiscono secondo una Normale.

In sostanza si procede alla valutazione del Chi quadro calcolato ottenuto come somma degli scarti quadratici tra le frequenze osservate (o sperimentali) della distribuzione e le frequenze teoriche di riferimento. Questo valore del Chi quadro calcolato deve risultare inferiore, per soddisfare il test, di quello del Chi quadro critico (o di riferimento) calcolato sulla base del numero di gradi di libertà e di una fissata significatività  $\alpha$ .

### **6.2.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO**

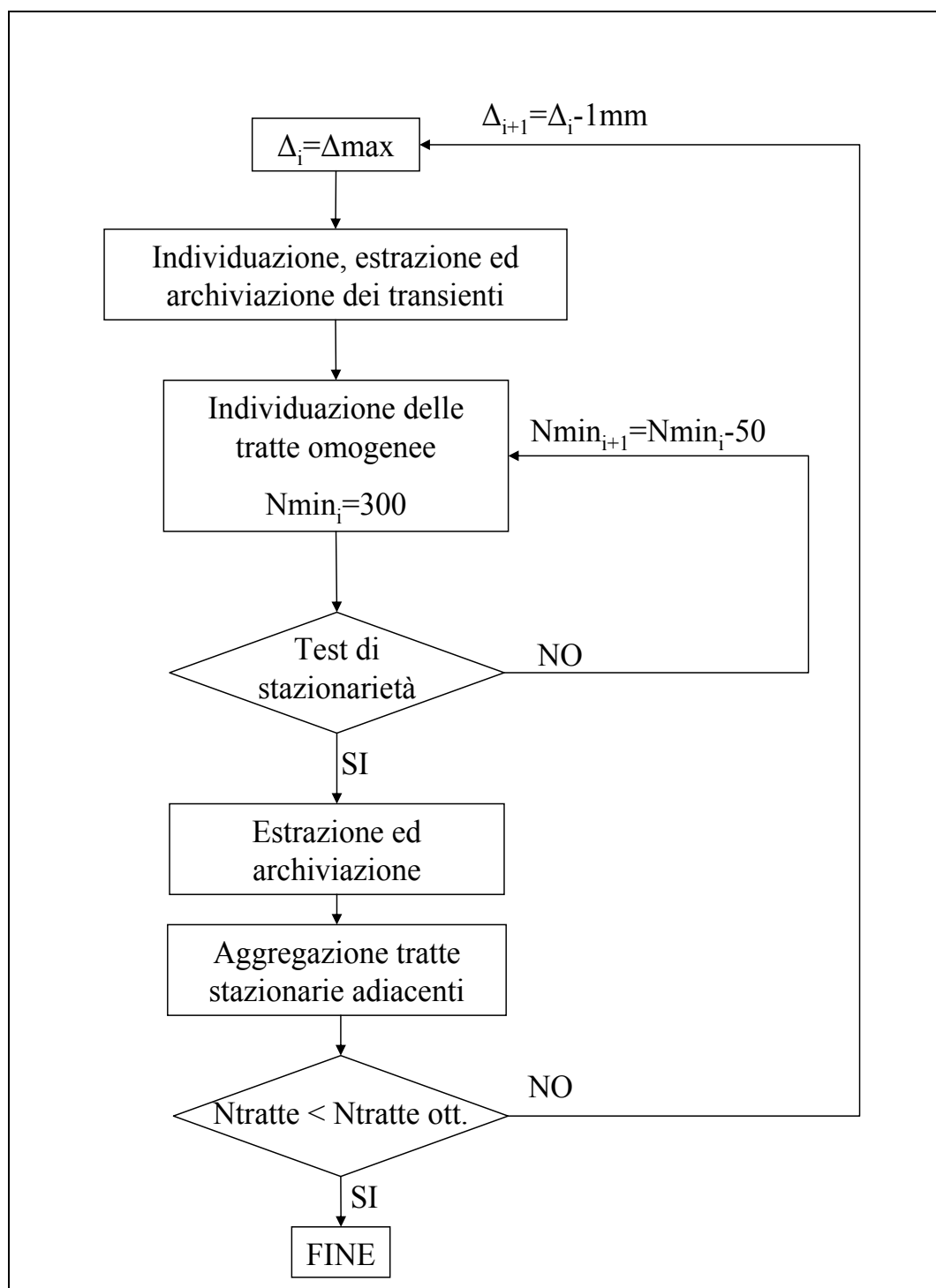
Come si è detto in precedenza, il modello è stato implementato sui dati ricondotti alle accelerazioni spaziali, infatti lavorare nel dominio delle accelerazioni spaziali presenta notevole vantaggi. I punti di non-stazionarietà, possono essere agevolmente identificati nel dominio delle accelerazioni spaziali, per poi essere esaminati separatamente dal resto del profilo. Infatti, analisi statistiche sui profili rilevati, in termini di elevation, mostrano che profili in cui sono presenti delle irregolarità puntuali sono altamente non stazionari, avendo una distribuzione molto lontana da una Gaussiana (distribuzione che si è dimostrato avere un processo stazionario), tuttavia, però, nulla ci dicono sulla localizzazione di tali fenomeni, in quanto il loro contributo si perde all'interno della distribuzione. Se però dal dominio delle elevation si passa a quello delle accelerazioni spaziali, i transienti possono essere individuati agevolmente. In primo luogo, l'analisi statistica sulla funzione distribuzione di probabilità delle accelerazioni spaziali conferma la non stazionarietà del processo (distribuzione lontana da una Gaussiana) ma si potranno anche identificare le irregolarità puntuali in quanto nel dominio delle accelerazioni spaziali la loro ampiezza risulterà amplificata in proporzione alla severità. Una elevata fluttuazione dei valori di RMS conferma ancora una volta la non stazionarietà del processo, ma se si procede all'analisi statistica dei momenti di ordine superiore skewness e kurtosi, si otterranno informazioni aggiuntive. In particolare, i picchi della funzione di kurtosi corrispondono ai transienti, ed i tratti in cui essa può ritenersi grossomodo costante suggerisce il numero di tratte stazionarie in cui suddividere il profilo.

---

Per questo motivo di opportunità si sono condotte le analisi nel campo delle accelerazioni spaziali, per cui la prima operazione da fare è stata quella di determinare le accelerazioni spaziali delle elevation del profilo (calcolata, per analogia, come derivata seconda dell'elevazione) mediante il metodo di derivazione alle differenze finite.

Dopo che le irregolarità puntuali sono state eliminate, ai fini dell'individuazione delle sezioni di analisi, è lecito aspettarsi che in un profilo così modificato si possano identificare tratte nelle quali il processo aleatorio assimilato possa ritenersi stazionario; aspettativa da verificare grazie al test di bontà di adattamento

Analisi preliminari di sensibilità hanno evidenziato come la scelta di un valore di  $\Delta$  (per l'individuazione delle irregolarità puntuali) progressivamente minore se, da un lato, forniva un numero gradualmente crescente di transienti, dall'altro, permetteva di individuare un numero di tratte stazionarie progressivamente minore. Avvertendo l'esigenza di contenere il numero di irregolarità concentrate individuate dall'algoritmo (che sono comunque di interesse per l'ente gestore) e, nel contempo, quello delle tratte stazionarie, si è sviluppata una procedura di ottimizzazione che consentisse di ridurre un profilo arbitrario al minor numero di tratte stazionarie e di irregolarità singolari.



**Fig. 6.5** - Rappresentazione schematica della procedura di analisi dei profili

La procedura, schematicamente descritta nella precedente figura 6.5, opera nel seguente modo:

- 
1. viene fissato un valore iniziale di  $\Delta$  ragionevolmente elevato e vengono individuate, estratte ed archiviate le irregolarità singolari;
  2. viene applicato il metodo dicotomico con un valore della dimensione minima della tratta,  $N_{min}$ , elevato e vengono conseguentemente individuate le relative tratte omogenee;
  3. le tratte così individuate vengono sottoposte a test di stazionarietà; se il risultato è positivo per tutte, la procedura si arresta e vengono eventualmente aggregate tratte stazionarie adiacenti se i test statistici effettuati sulla serie aggregata risultano soddisfatti; se invece vengono individuate una serie di tratte omogenee non stazionarie, queste ultime vengono nuovamente sottoposte al metodo dicotomico con un valore di  $N_{min}$  progressivamente minore;
  4. la procedura non si arresta fino a quando il profilo in esame risulta costituito da tutte tratte stazionarie; se la dimensione delle tratte è assai piccola, od equivalentemente, la loro numerosità risulta essere eccessiva, si sceglie un valore del  $\Delta$  inferiore e si ripete integralmente la procedura al fine di ottenere un numero complessivo di tratte stazionarie inferiore.

### **6.3 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO SU PROFILI DI PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO**

Una volta messo a punto, il Modello è stato implementato sui dati rilevati con l'attrezzatura ad alto rendimento e trattati preventivamente come indicato in precedenza. Vale la pena ricordare che in prima analisi si sono utilizzati i profili indisturbati, cioè quei tratti di profilo non affetti da perdite di segnale causate da irregolarità che risultassero maggiori del range di lettura del profilometro.

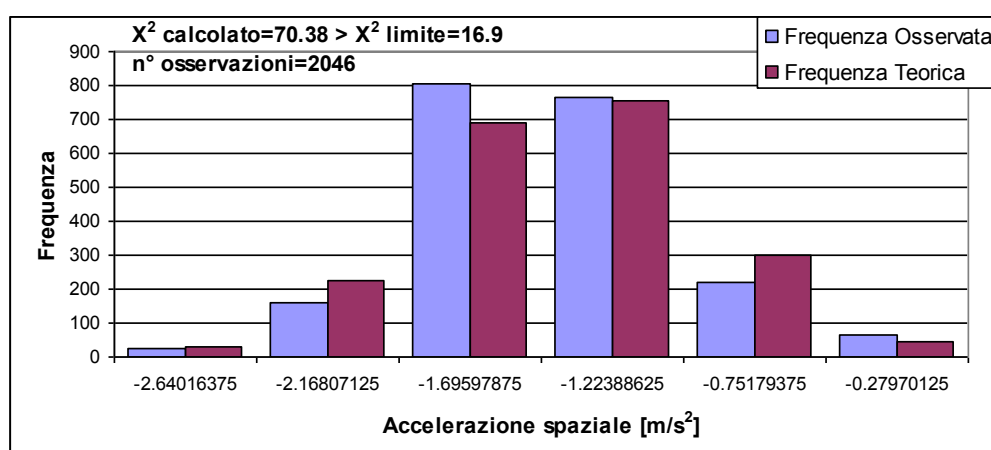
La procedura precedentemente descritta è stata applicata all'analisi di un campione di profili, arbitrariamente scelti, acquisiti su pavimentazioni in lastricato. Il passo di campionamento con cui sono stati restituiti i profili è di 10 cm che, trattandosi di un lastricato con dimensioni medie degli elementi superiori ai 20 cm, in base alle considerazioni formulate in precedenza, può ritenersi accettabile.

Il primo passo è quindi stato quello di applicare un test di stazionarietà a questi profili così come forniti dal profilometro. La verifica di stazionarietà, è stata condotta sulla accelerazione spaziale del profilo, come descritto nel paragrafo precedente, mediante



l'esecuzione di un test statistico Chi-quadro per la valutazione della bontà di adattamento rispetto ad una distribuzione normale.

La verifica preliminare di stazionarietà ha dato per ogni profilo esito negativo, a titolo di esempio si riporta il risultato del test Chi-quadro non verificato per un profilo intero di 200 m (lastricato laser1), su tratta indisturbata (assenza di perdita di segnale), calcolato sul profilo "tal quale" (così come fornito dal profilometro). I risultati sono espressi in termini di confronto tra le distribuzioni di frequenza teorica e misurata.



**Fig. 6.6** - Risultati del test Chi quadro per un profilo non stazionario

L' Istogramma della distribuzione della accelerazione spaziale del profilo evidenzia la non stazionarietà del processo essendo la distribuzione lontana da una Normale.

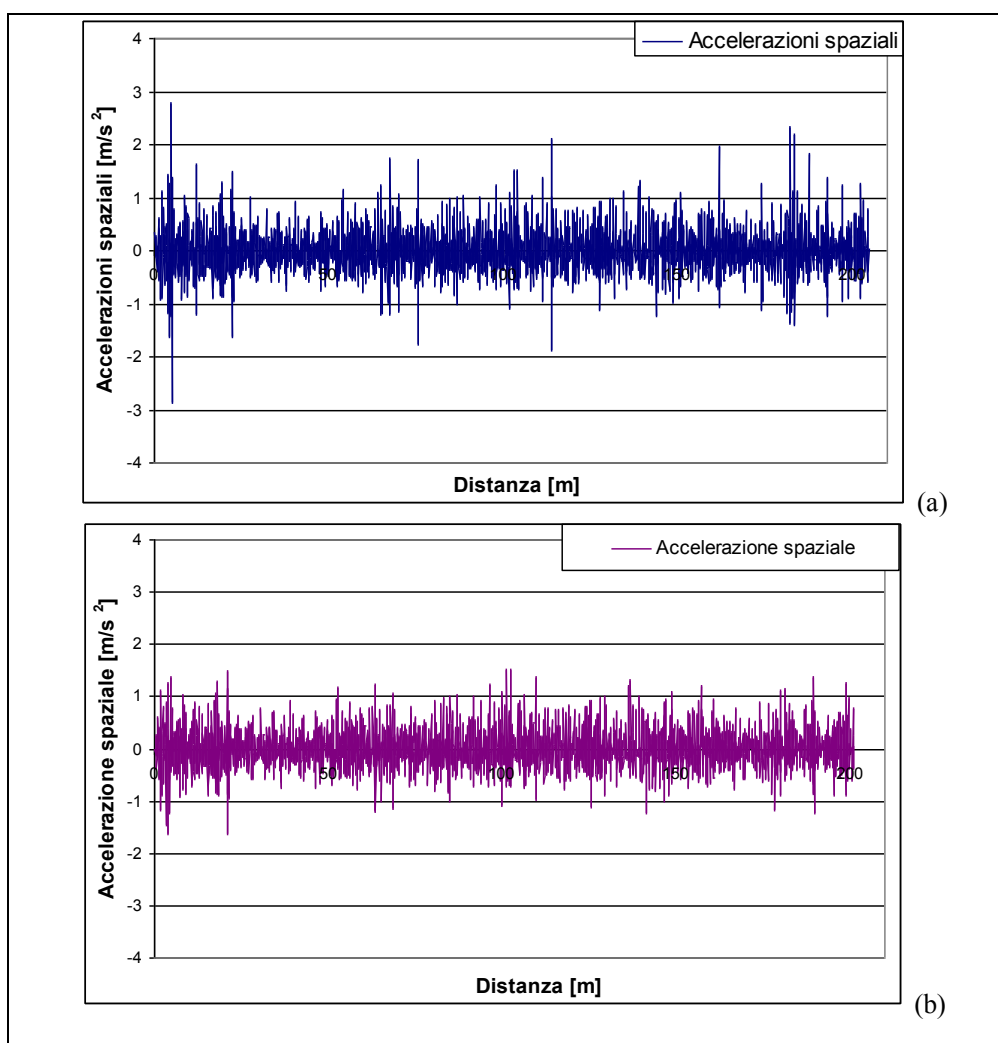
Assodata quindi la non stazionarietà del processo valutata sul profilo così come fornito dal profilometro, si è quindi proceduto con gli step successivi del modello andando ad eliminare le irregolarità puntuali con il Modello basato sul confronto tra il profilo originale ed un profilo artificiale smussato ottenuto antitrasformando lo spettro di ampiezze del profilo originale privato del contenuto in frequenza corrispondente a quei punti in cui l'ampiezza dello spettro è risultata costantemente inferiore al 10% del valore di picco.

Nell'applicare la procedura precedentemente descritta, si è partiti da un valore di  $\Delta$  iniziale pari a 10 mm che, come già spiegato in precedenza, restituiva un numero di irregolarità localizzate compatibile con la frequenza osservata nei sopralluoghi visivi che hanno preceduto l'esecuzione delle misure. È evidente che, in relazione alla specifica tipologia di pavimentazione analizzata, tale valore deve essere opportunamente riconsiderato.

$$-1\text{cm} < \Delta < 1\text{cm}$$

Una volta individuati gli intervalli in cui la condizione precedente non è verificata, tali tratti vanno eliminati dal profilo provvedendo ad effettuare una traslazione verticale del profilo successivo al tratto eliminato, onde evitare di introdurre involontariamente ulteriori punti di salto.

Nella figura seguente, a titolo puramente indicativo, per uno stesso profilo, viene riportato il confronto, espresso in termini di accelerazione spaziale, tra il profilo originario e quello depurato dai transienti.



**Fig. 6.7** - Confronto tra il profilo originario (a) e quello depurato dei transienti con un valore di  $\Delta$  pari a 10 mm (b)

Il grafico dell'andamento dell'accelerazione spaziale calcolata sul profilo di partenza depurato dalle irregolarità puntuali evidenzia un miglioramento della situazione. Infatti le fluttuazioni delle accelerazioni spaziali risultano essere più contenute rispetto al caso di profilo non depurato dalle irregolarità, non attingendo mai valori superiori a  $2 \text{ m/s}^2$ . Questo miglioramento della situazione è confermato anche dai risultati del test Chi-

---

quadro effettuato sulle accelerazioni spaziali calcolate sul profilo depurato delle irregolarità.

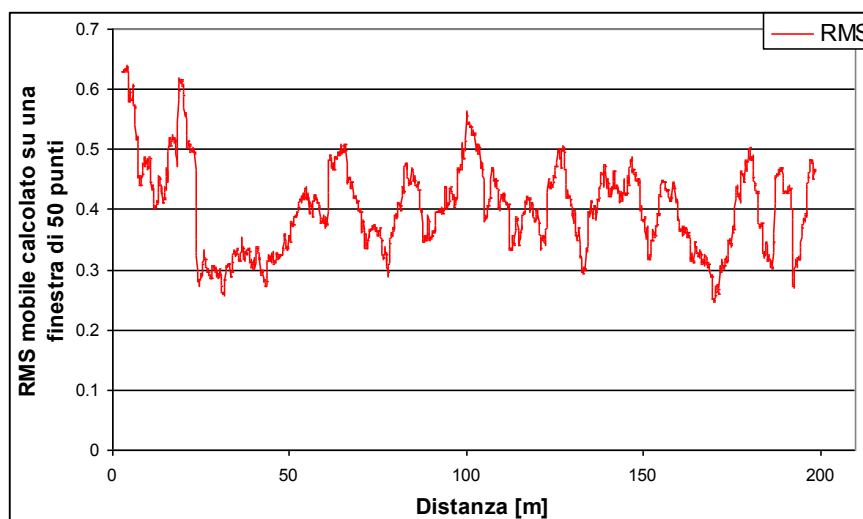
I risultati del test sono infatti migliori del caso precedente, ma lo stesso risulta ancora non verificato per cui il processo deve ancora definirsi non stazionario.

Dopo che le irregolarità puntuali sono state eliminate, è lecito aspettarsi che in un profilo così modificato si possano identificare tratte nelle quali il processo aleatorio assimilato possa ritenersi stazionario.

Possiamo quindi procedere nell'implementazione del Modello applicando il metodo dicotomico per l'individuazione di sotto-tratte omogenee.

I dati di input del metodo dicotomico devono essere tali da rendere agevole l'individuazione delle tratte in cui si verificano variazioni significative nelle statistiche della serie di dati.

Per tale motivo come dati di input si sono utilizzati i valori dell' RMS (Root Mean Square) mobile, calcolato cioè in una finestra mobile di 5m, banda definita in funzione del passo di campionamento del profilo (pari a 10 cm) in modo da rendere possibile il calcolo dell'RMS su almeno 50 punti.



**Fig 6.7** - Dati di input del metodo dicotomico: RMS della accelerazione spettrale del profilo depurato dalle irregolarità concentrate su base mobile di 50 punti

Una volta effettuata la verifica dell' omogeneità dell'intera serie di dati, in caso di rifiuto si procede con l'algoritmo di sezionamento individuando il primo punto di frontiera. L'algoritmo procede poi iterativamente in modo tale da ripetere la verifica dell'omogeneità sui due nuovi segmenti ottenuti.

Si cessa di cercare break point quando ogni sezione risulta omogenea oppure quando le misure rimanenti sono inferiori al numero prefissato. Per ogni sezione omogenea individuata, si calcolano inoltre i parametri caratteristici media e varianza.

I motivi per imporre un numero minimo di misure per la sezione omogenea sono duplici:

il primo è che per la natura intrinseca dei dati si ritiene che le misure non possano variare sensibilmente in un intervallo troppo ristretto; il secondo è che il test di omogeneità verifica che la quantità  $u$  sia distribuita come una variabile normale standardizzata (media nulla e varianza unitaria), quindi non è significativo quando la numerosità del campione è inferiore a 25.

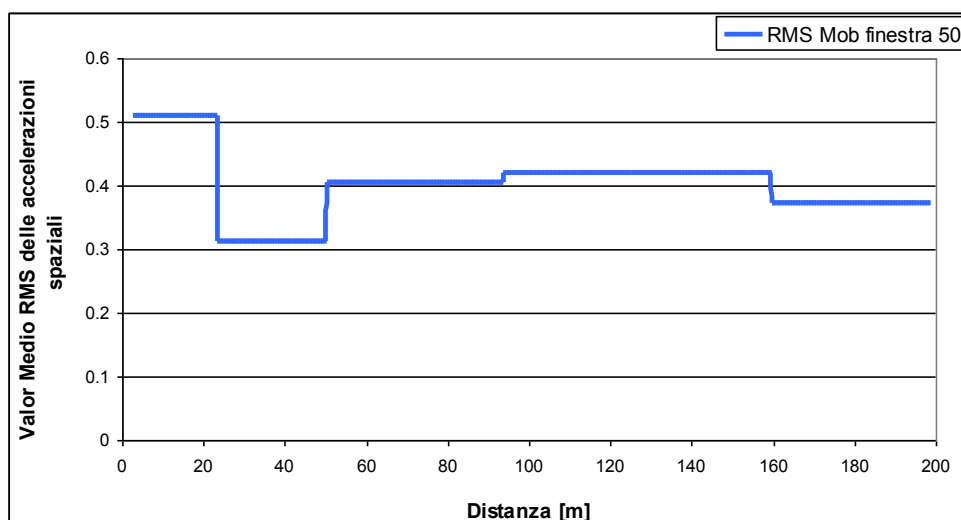
Il metodo richiede di definire tale quantità minima (comunque superiore a 25) e la probabilità di falso rifiuto  $\alpha$ , espressa in percentuale, che si vuole adottare nel test di omogeneità.

I risultati hanno evidenziato che il sezionamento non è influenzato tanto dal livello di significatività  $\alpha$ , ma lo è fortemente dalla scelta della numerosità minima  $N_{min}$ .

n° sezione	Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	iniziale m	finale m	Intervallo m
1	0.0027	0.0234	0.509466548	4.65E-03	2.7	23.4	20.7
2	0.0234	0.0502	0.312290868	5.67E-04	23.4	50.2	26.8
3	0.0502	0.0937	0.404755546	2.18E-03	50.2	93.7	43.5
4	0.0937	0.1596	0.420602623	2.60E-03	93.7	159.6	65.9
5	0.1596	0.1986	0.373413937	4.46E-03	159.6	198.6	39

**Tabella 1** - Output del metodo dicotomico con l'individuazione delle tratte omogenee con  $\alpha=1\%$  ed  $N_{min}=200$

Associando ad ogni sezione omogenea il parametro caratteristico valore medio, si può osservare in che modo la serie originaria sia modellata dai risultati della analisi:

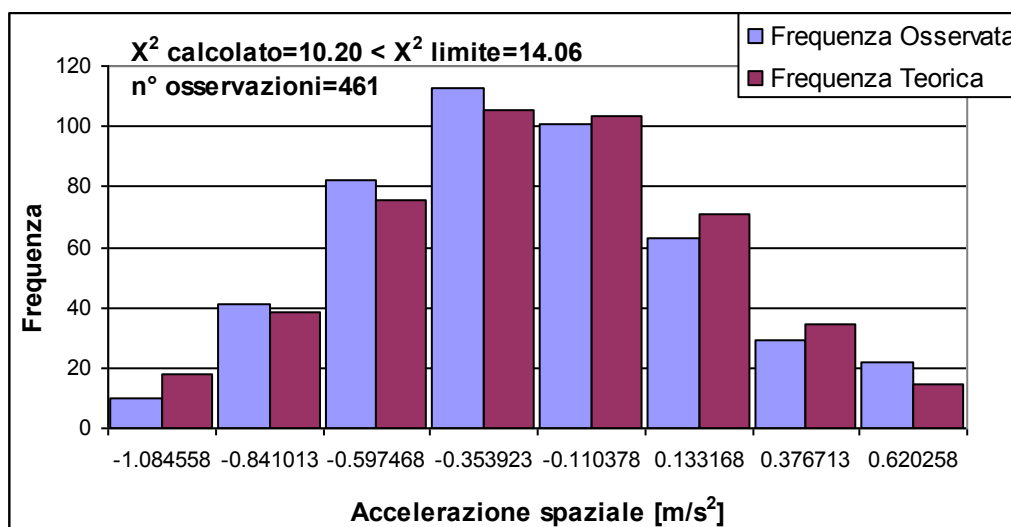


**Fig 6.8** - Andamento del valor medio dell'RMS calcolato su una finestra di 50 punti all'interno delle tratte omogenee individuate.

Una volta ottenuto un profilo privo di difetti puntuali, e suddiviso in tratte omogenee presumibilmente stazionarie, si può procedere alla verifica dell'effettiva stazionarietà delle singole sezioni, attraverso la ripetizione del test di bontà di adattamento  $\chi^2$  che in precedenza aveva dato risultati negativi.

Se il test di stazionarietà applicato alle tratte omogenee individuate risulta verificato per ognuna di esse, allora tali sezioni individuano parti del profilo in cui il processo può ritenersi stazionario; infatti le accelerazioni spaziali hanno una distribuzione prossima ad una normale.

A titolo di esempio si riporta il risultato del test Chi-quadro, che risulta verificato, nella tratta numero 3 di 43.5 m:



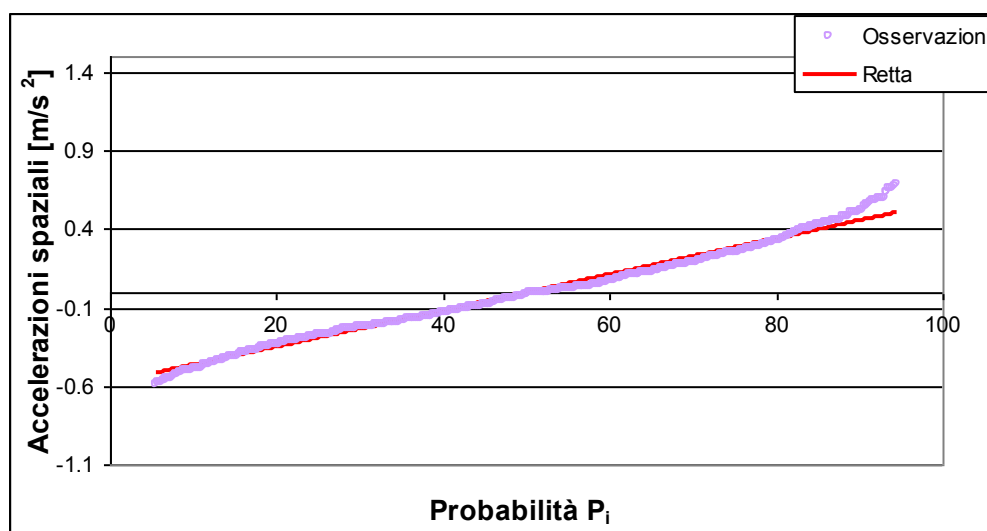
**Fig 6.9** - Test di stazionarietà  $\chi^2$  che risulta verificato all'interno della sotto tratta omogenea

La stazionarietà del processo all'interno di una sotto tratta omogenea, è confermata anche dal Normal Probability Plot. Per costruire tale diagramma, che consiste in una ulteriore verifica di adattamento di una distribuzione data ad una teorica (normale), ordiniamo i dati in maniera crescente attribuendo rango  $i$  all' $i$ -esima osservazione ordinata.

Le osservazioni ordinate vengono riportate sul normal probability plot in funzione di  $P_i = 100 \times [(i-0.5)/n]$  (valori sull'asse delle  $x$ ). Le osservazioni ordinate corrispondenti vengono riportate sull'asse delle  $y$ . La scala su tale asse va fissata in modo da comprendere i valori minimo e massimo osservati.

Quindi si verifica se i punti del grafico cadono abbastanza prossimi a una retta. Se ciò avviene accettiamo l'ipotesi che i dati siano distribuiti secondo la normale.

Le discrepanze dei punti estremi (valore massimo e valore minimo) sono maggiori di quelle dei punti centrali. Pertanto nel tracciare la retta si privilegia una retta che abbia un maggiore accordo con i punti centrali



**Fig 6.10** - Normal Probability Plot per la stessa tratta di prima in cui risulta verificata l'ipotesi che le accelerazioni spaziali si distribuiscano come una normale.

Per arrivare a convergenza, il test di stazionarietà deve essere verificato per tutte le tratte individuate dal metodo dicotomico. E' tuttavia ammissibile che il test non sia verificato per l'ultimo tratto in cui, essendo la rimanenza del profilo, il test si arresta più presumibilmente proprio per il vincolo di lunghezza del profilo che non per una avvenuta stazionarietà.

Nel profilo portato ad esempio, il test Chi-quadro non è verificato per tutte le tratte, è quindi stato necessario applicare nuovamente il metodo dicotomico diminuendo Nmin.

La tendenza è quella di diminuire progressivamente l'Nmin fino ad ottenere n tratte tutte stazionarie.

Tuttavia, non è sempre detto che diminuendo Nmin fino al minimo consentito (paria a 25), si riescano ad individuare tratte che siano tutte stazionarie. In tal caso l'unica soluzione possibile è quella di tornare a monte e diminuire il valore di  $\Delta$  in modo da individuare, e scartare, un maggior numero di irregolarità puntuali.

A tal proposito si riporta in tabella seguente l'andamento della frequenza dei transienti, al diminuire del  $\Delta$ , per tre profili campione:

PRIMO PROFILO DA 204.8 m					
	Numeri superamenti	Numero Irregolarità	L profilo depurato da Irregolarità	Frequenza Irregolarità	Valor Medio RMS delle accelerazioni spaziali del profilo senza irregolarità, calcolato con una finestra di 50 punti
$\Delta = 10$ mm	33	20	201.5	10.24	0.402255688
$\Delta = 9$ mm	52	33	199.6	6.206060606	0.401069372
$\Delta = 7$ mm	122	68	192.6	3.011764706	0.383736273

PROFILO DA 102.4 m					
	Numeri superamenti	Numero Irregolarità	L profilo depurato da Irregolarità	Frequenza Irregolarità	Valor Medio RMS delle accelerazioni spaziali del profilo senza irregolarità, calcolato con una finestra di 50 punti
$\Delta = 10$ mm	13	11	101.1	9.309090909	0.405786072
$\Delta = 8$ mm	34	22	99	4.654545455	0.389025946
$\Delta = 7$ mm	52	32	97.2	3.2	0.371452658

SECONDO PROFILO DA 204.8 m					
	Numeri superamenti	Numero Irregolarità	L profilo depurato da Irregolarità	Frequenza Irregolarità	Valor Medio RMS delle accelerazioni spaziali del profilo senza irregolarità, calcolato con una finestra di 50 punti
$\Delta = 10$ mm	30	14	201.8	14.62857143	0.405370476
$\Delta = 8$ mm	85	56	196.3	3.657142857	0.389080313
$\Delta = 7$ mm	169	86	187.9	2.381395349	0.380826555

**Tabella 2** – Frequenza delle irregolarità puntuali al variare del  $\Delta$ , per tre profili in lastricato

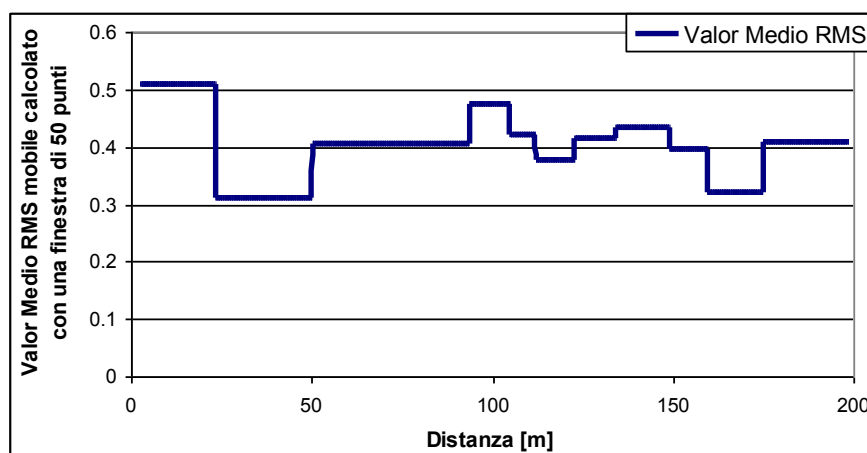
Nelle tabelle successive (Tabella 3 e 4) sono riportati i risultati finali delle elaborazioni per 3 profili esaminati.

Dall'analisi dei dati riportati in tabella sembra interessante osservare che, nell'ambito di uno specifico allineamento, esiste una forte variabilità nel livello di irregolarità, espresso in termini di RMS della accelerazione spaziale. Un'analisi dei profili tal quali potrebbe pertanto condurre ad una sensibile sottostima (o sovrastima) delle caratteristiche spettrali e statistiche del profilo stesso, che può avere risvolti negativi nella valutazione dei relativi Indicatori di Prestazione e quindi nella conseguente

programmazione delle attività di manutenzione o nello sviluppo di adeguati modelli di degrado.

PROFILO 1, numero di irregolarità concentrate = 20, RMS medio accelerazione = 0.4022 m/s <sup>2</sup>						
ID tratta	Progr. Iniziale [m]	Progr. Finale [m]	Estensione [m]	Nmin	Delta [mm]	RMS accel. [m/s <sup>2</sup> ]
1	2.7	23.4	20.7	300	10	0.509467
2	23.4	50.2	26.8	200	10	0.312291
3	50.2	93.7	43.5	200	10	0.404756
4	93.7	104.9	11.2	50	10	0.475132
5	104.9	112	7.1	50	10	0.421012
6	112	122.9	10.9	50	10	0.376793
7	122.9	134.3	11.4	50	10	0.415682
8	134.3	149.1	14.8	50	10	0.434846
9	149.1	159.6	10.5	50	10	0.397276
10	159.6	175	15.4	150	10	0.321889
11	175	198.6	23.6	150	10	0.406996

**Tabella 3** - Risultati forniti dalla procedura per il profilo 1



**Fig 6.11** - Andamento del valor medio dell'RMS calcolato su una finestra di 50 punti, per le 11 tratte stazionarie individuate per il profilo 1.

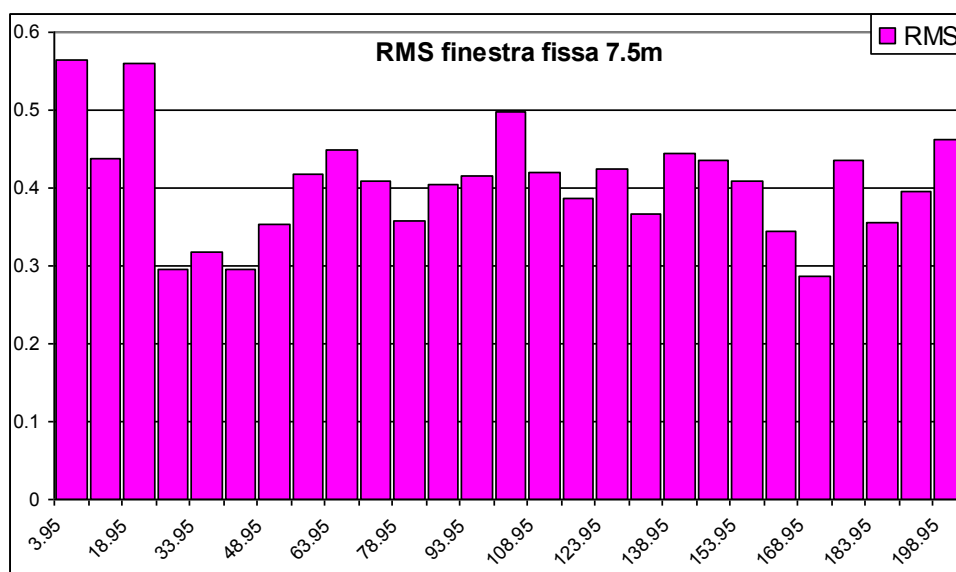


PROFILO 2, numero di irregolarità concentrate = 11, RMS medio accelerazione = 0.4058 m/s <sup>2</sup>						
ID tratta	Progr. Iniziale [m]	Progr. Finale [m]	Estensione [m]	Nmin	Delta [mm]	RMS accel. [m/s <sup>2</sup> ]
1	2.7	36.5	33.8	200	10	0.4514
2	36.5	55.2	18.7	170	10	0.325997
3	55.2	98.5	43.3	170	10	0.404668
PROFILO 3, numero di irregolarità concentrate = 56, RMS medio accelerazione = 0.3890 m/s <sup>2</sup>						
ID tratta	Progr. Iniziale [m]	Progr. Finale [m]	Estensione [m]	Nmin	Delta [mm]	RMS accel. [m/s <sup>2</sup> ]
1	2.7	12.1	9.4	30	8	0.532302
2	12.1	16	3.9	30	8	0.468266
3	16	47.3	31.3	300	8	0.311289
4	47.3	85	37.7	175	8	0.396116
5	85	125.7	40.7	175	8	0.391991
6	125.7	143.1	17.4	125	8	0.422173
7	143.1	156.2	13.1	100	8	0.390913
8	156.2	167.3	11.1	100	8	0.300594
9	167.3	193.4	26.1	200	8	0.418699

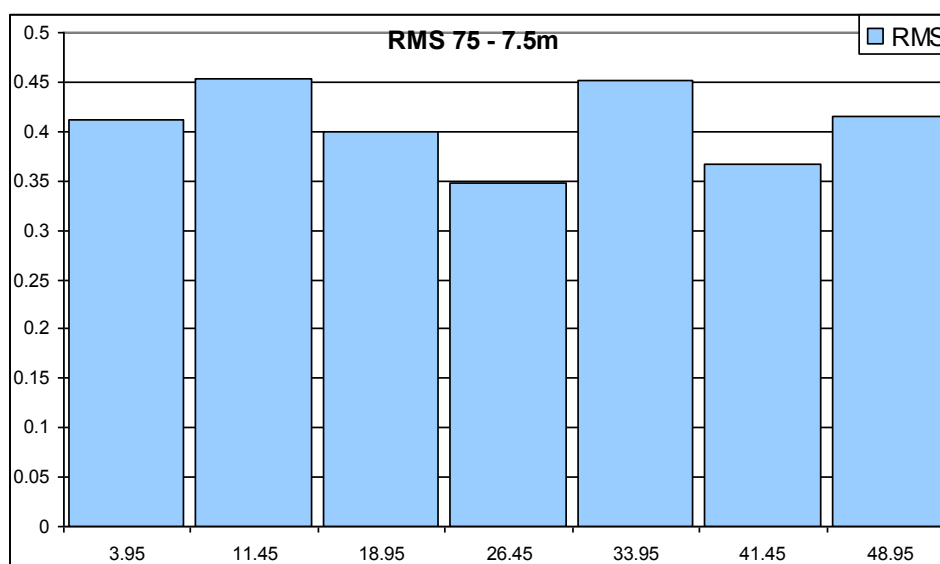
**Tabella 4** - Risultati forniti dalla procedura per il profilo 2 e 3.

### 6.3.1 ULTERIORI VERIFICHE DI VALIDITA' DEL MODELLO PROPOSTO

La sostanziale stazionarietà del processo può essere confermata anche da ulteriori analisi statistiche che possono essere condotte. Infatti, in un processo stazionario l'RMS calcolato in una finestra di ampiezza fissa e sufficientemente grande, nel nostro caso abbiamo assunto 7.5 m, in assenza di sovrapposizioni tra le stesse, deve risultare essenzialmente costante, perché grosse variazioni in grafici così costruiti indicano la non stazionarietà del processo; come si può evincere dai grafici sottostanti in cui si riportano l'RMS con finestra fissa di 7.5 m senza sovrapposizioni calcolato per un profilo di 200m non stazionario, e l'RMS con finestra fissa di 7.5 m senza sovrapposizioni, calcolato per una delle sotto-tratte omogenee derivate dall'applicazione del metodo dicotomico al profilo precedente depurato delle irregolarità, e che verifica il test di stazionarietà:



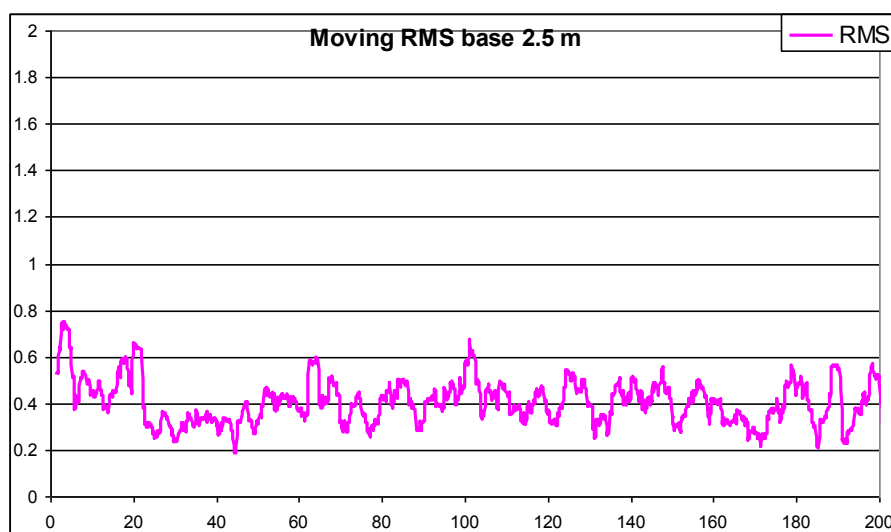
**Fig. 6.12** - RMS con finestra fissa di 7.5 m senza sovrapposizioni,calcolato per un profilo di 200m non stazionario.



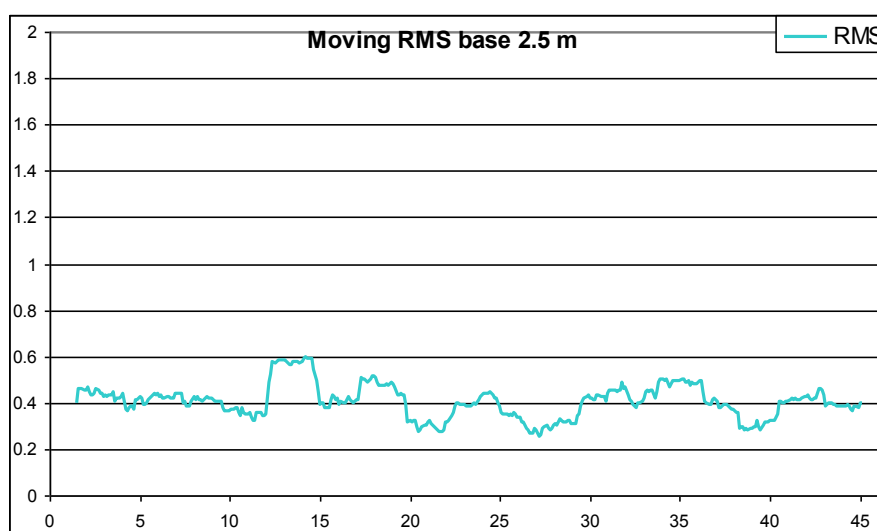
**Fig. 6.13** - RMS con finestra fissa di 7.5 m senza sovrapposizioni,calcolato per una delle sotto-tratte omogenee derivate dall'applicazione del metodo dicotomico al profilo precedente depurato delle irregolarità.

Ulteriormente, andiamo a valutare il grafico di RMS mobile calcolato con una finestra di estensione piccola (2,5 m). Grandi e sostenute variazioni in grafici di RMS così costruiti implicano la non stazionarietà del processo; come si potrà notare dall'esame dei grafici sottostanti che riportano l'RMS con finestra mobile di 2.5 m calcolato per il profilo intero di 200m e non stazionario, ed il grafico dell'RMS con finestra mobile di 2.5 m calcolato per una delle sotto-tratte omogenee derivate dall'applicazione del

metodo dicotomico al profilo precedente depurato delle irregolarità e che verifica il test di stazionarietà:

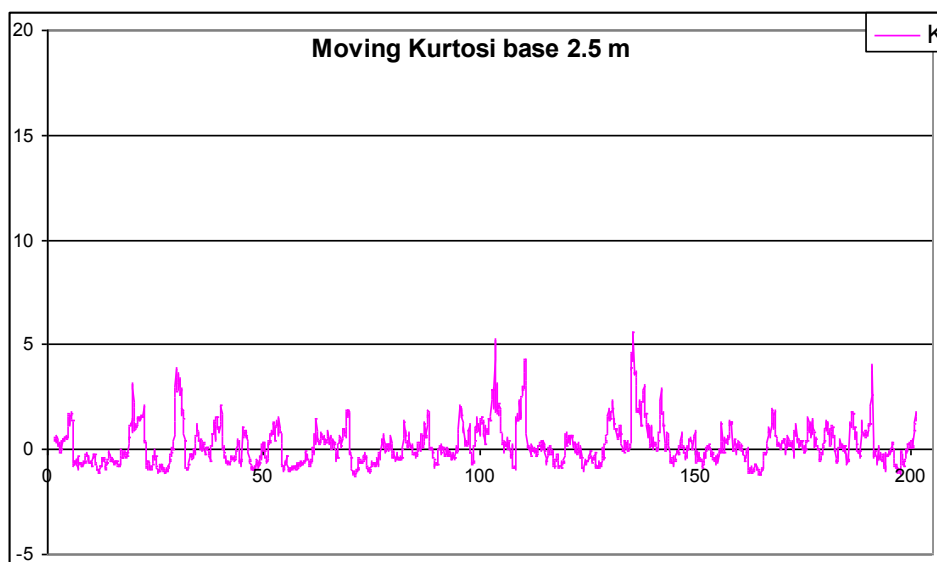


**Fig. 6.14** - Moving RMS con finestra mobile di 2.5 m calcolato per il profilo intero di 200m e non stazionario

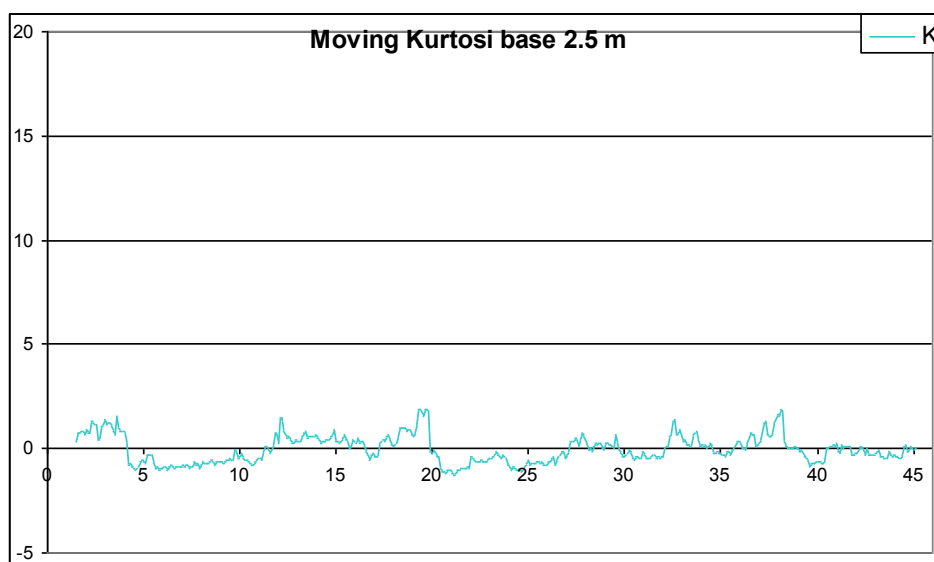


**Fig. 6.15** - Moving RMS con finestra mobile di 2.5 m calcolato per una delle sottotratte omogenee derivate dall'applicazione del metodo dicotomico al profilo precedente depurato delle irregolarità e che verifica il test di stazionarietà

Andando adesso a valutare un diagramma di Moving Kurtosi ottenuto con finestra mobile di 2.5 m, è possibile affermare che punti in cui la kurtosi assume momentaneamente picchi molto alti, implicano la presenza di transienti (irregolarità puntuali). Come è possibile osservare dai grafici seguenti, picchi di kurtosi sono presenti nel diagramma relativo al profilo intero che non ha soddisfatto il test di stazionarietà, mentre sono assenti nel grafico relativo alla sottotratta stazionaria rilevata dal metodo dicotomico e precedentemente depurata dei transienti.



**Fig. 6.16** - Moving kurtosi con finestra mobile di 2.5 m calcolato per il profilo intero di 200m e non stazionario.



**Fig. 6.17** - Moving kurtosi con finestra mobile di 2.5 m calcolato per una delle sotto-tratte omogenee derivate dall'applicazione del metodo dicotomico al profilo precedente depurato delle irregolarità e che verifica il test di stazionarietà

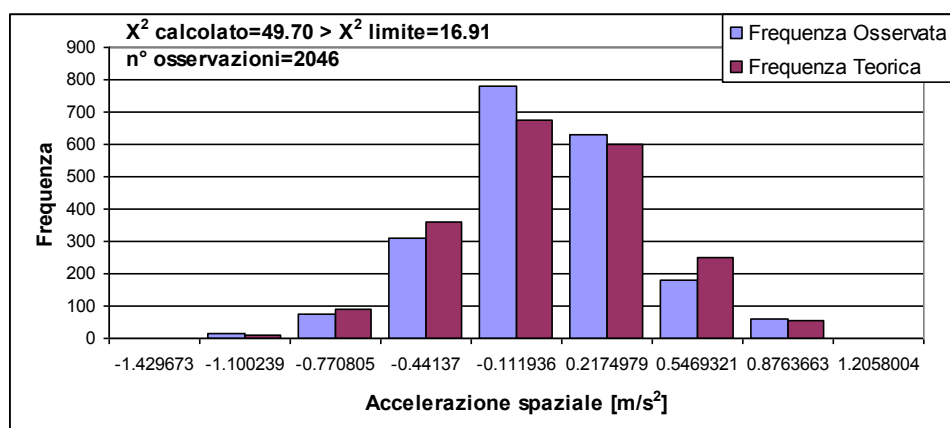
## 6.4 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO SU PROFILI DI PAVIMENTAZIONI IN CUBETTI

La procedura precedentemente descritta è stata applicata anche all'analisi di un campione di profili, arbitrariamente scelti, acquisiti su pavimentazioni in cubetti.

Questa ulteriore implementazione ci ha permesso di valutare le differenze che la metodologia di analisi fornisce al variare della tipologia di pavimentazione.

Il passo di campionamento con cui sono stati restituiti i profili è stato ancora di 10 cm. Chiaramente, coerentemente con quanto già proposto per le pavimentazioni in lastricato, è stata preliminarmente condotta una verifica di stazionarietà sui profili interi così come forniti dal profilometro che, per ogni profilo, ha dato esiti negativi.

Di seguito si riportano i risultati del test per uno dei profili investigati:

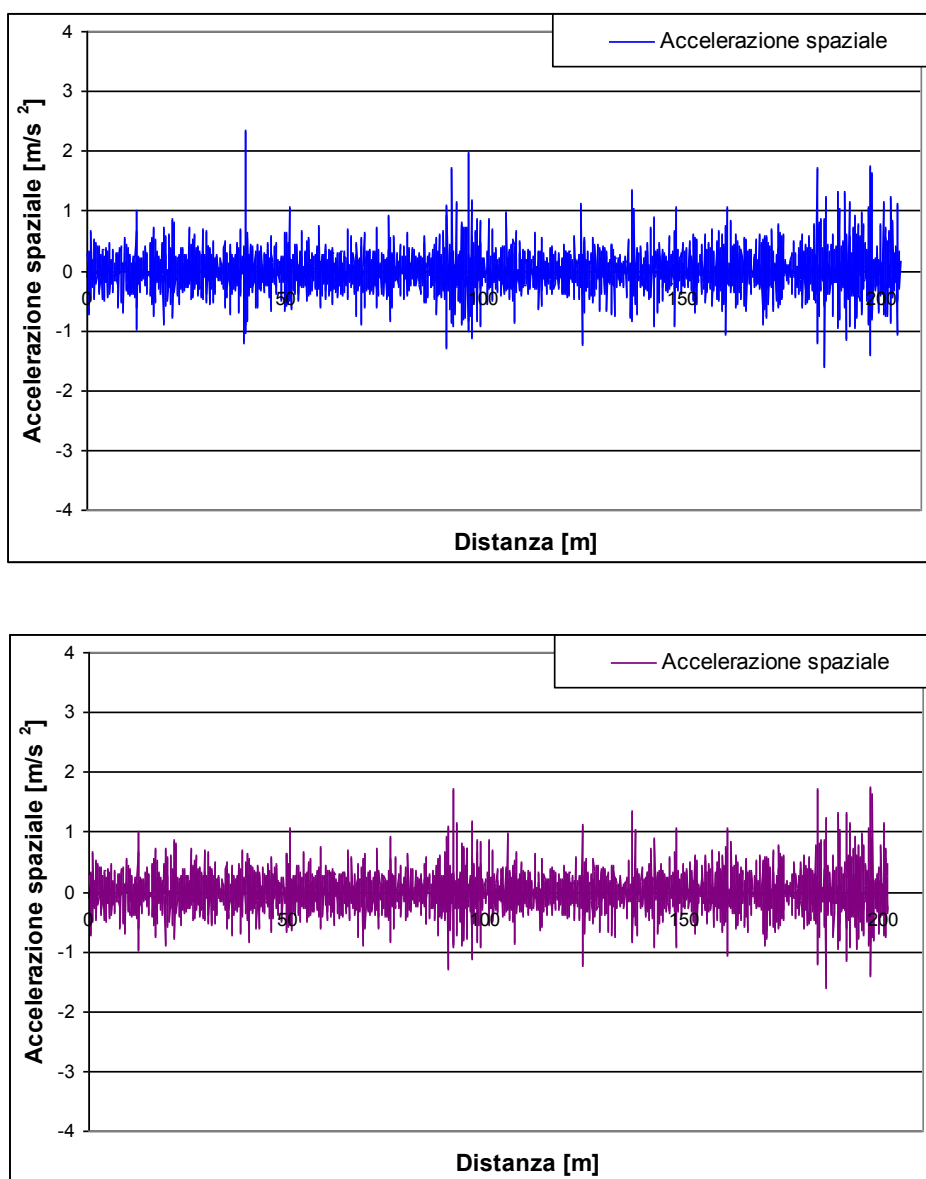


**Fig. 6.18** - Risultati del test Chi quadro per un profilo intero non stazionario, senza l'applicazione della metodologia proposta

Si è quindi successivamente applicata la procedura per l'eliminazione delle irregolarità puntuali precedentemente descritta, partendo da un valore di  $\Delta$  iniziale pari a 10 mm che, come già spiegato in precedenza, anche in questo caso restituiva un numero di irregolarità localizzate compatibile con la frequenza osservata nei sopralluoghi visivi che hanno preceduto l'esecuzione delle misure. E' opportuno sottolineare che si è osservato che la metodologia per l'individuazione delle irregolarità se applicata alle pavimentazioni in cubetti fornisce, a parità di  $\Delta$ , un numero di irregolarità puntuali minore rispetto al caso delle pavimentazioni in lastricato. Si è inoltre osservato che la procedura è sempre influenzata dal valore di  $\Delta$  che si imposta come soglia per l'individuazione del transiente, ma risulta essere meno sensibile alla variazione dello stesso; la metodologia fornisce comunque un numero di irregolarità maggiore al diminuire di  $\Delta$ , ma tale variazione appare assai più contenuta rispetto al caso del lastricato.

Con riferimento all'esempio riportato in figura 6.18, la metodologia applicata ad un profilo di lunghezza pari a circa 205 m con un  $\Delta$  pari a 10mm ha individuato solo 3 irregolarità (risultato comunque coerente con le osservazioni visive, considerando che tale pavimentazione appariva in buono stato).

Nella figura seguente, a titolo puramente indicativo, per uno dei profili investigati, viene riportato il confronto, espresso in termini di accelerazione spaziale tra il profilo originario e quello depurato dai transienti.



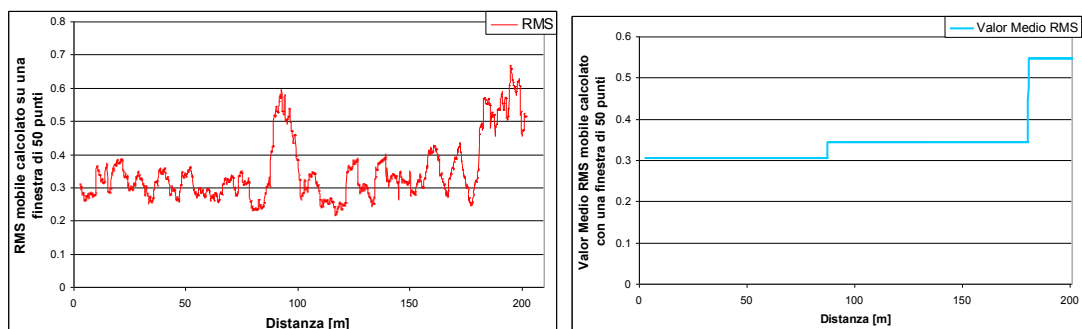
**Fig. 6.19** - Confronto accelerogramma del profilo originario (a) e quello depurato dei transienti con un valore di  $\Delta$  pari a 10 mm (b)

Successivamente è stata applicata la procedura dicotomica ai profili depurati dalle irregolarità, espressi in termine di radice quadrata del valore quadratico medio (RMS) dell'accelerazione spaziale calcolato su una finestra mobile di 50 punti, assumendo un valore iniziale di dimensione minima della tratta omogenea pari a 300 punti.

Nella figura 6.20 è riportato, sempre per lo stesso profilo, la rappresentazione in termini di RMS e la successiva riduzione in tratte omogenee. A valle di tale analisi solo alcune delle tratte individuare sono risultate stazionarie.

Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	Ampiezza intervallo [m]	Numero tratte
0.0027	0.0876	0.3055315	1.26E-03	84.9	1
0.0876	0.1809	0.3430242	6.01E-03	93.3	2
0.1809	0.2019	0.546326	2.60E-03	21	3

**Tabella 5** - Risultati del metodo dicotomico

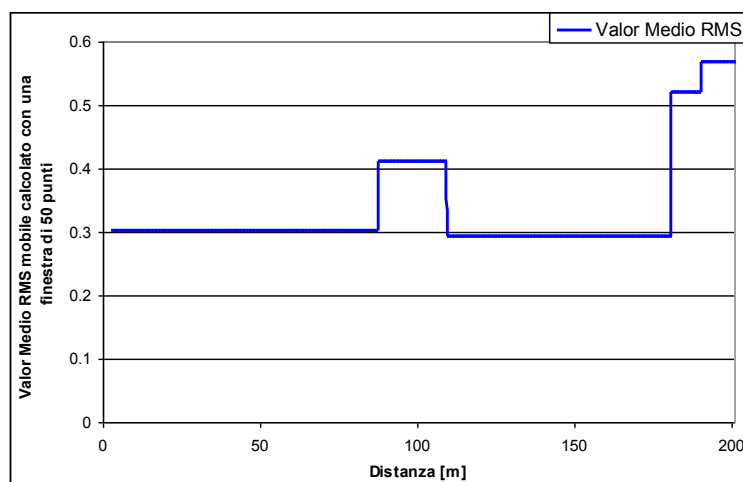


**Fig. 6.20** - RMS della accelerazione spettrale del profilo depurato dalle irregolarità concentrate su base mobile di 50 punti (a). riduzione in tratte omogenee (b)

E' stato quindi necessario applicare nuovamente il metodo dicotomico per il sezionamento in tratte omogenee diminuendo però il valore di Nmin. Così si è riusciti a pervenire ad una configurazione finale in cui tutte le tratte individuate risultassero stazionarie, cioè tutte le sezioni omogenee fornite dal metodo dicotomico soddisfano il test di bontà di adattamento Chi-quadro. Successivamente sono state accorpate le tratte adiacenti la cui composizione risultava ancora soddisfare il test di stazionarietà. Alla fine, sempre per il profilo portato a titolo di esempio, si è potuti pervenire ad una configurazione finale in cui sono state individuate 5 tratte tutte stazionarie:

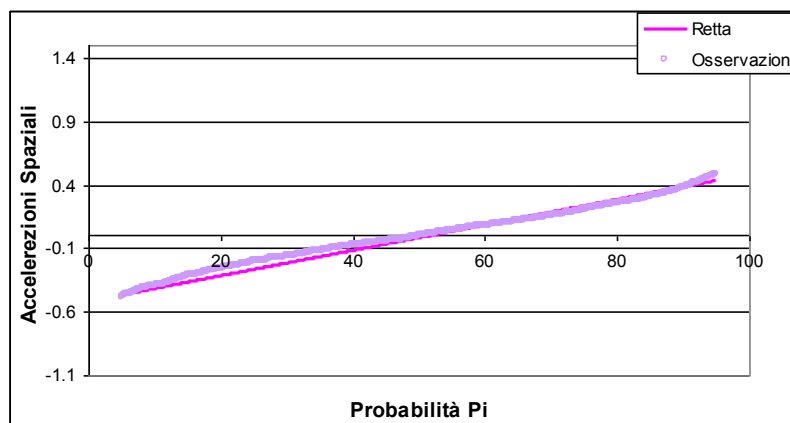
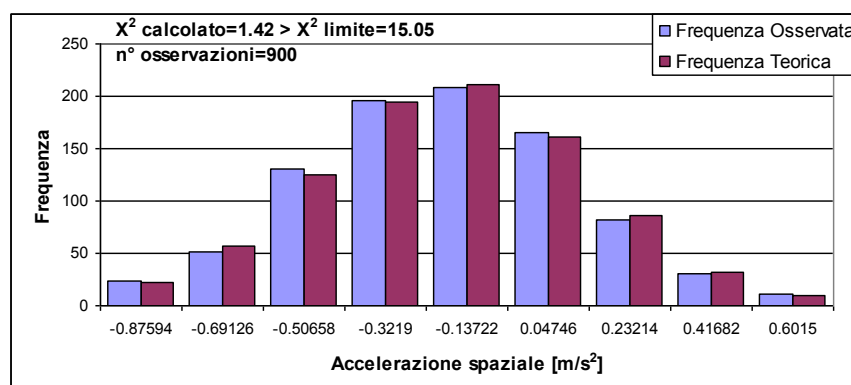
Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	Iniziale [m]	Finale [m]	Ampiezza intervallo [m]	Numero tratte	Risultato test	$\chi^2$ calcolato	$\chi^2$ limite
0.0027	0.0876	0.30287996	0.001042	2.7	87.6	84.9	1	stazionario	1.42	15.5
0.0876	0.1095	0.41187176	0.002094	87.6	109.5	21.9	2	stazionario	13.93	14.06
0.1095	0.1809	0.29298323	0.001081	109.5	180.9	71.4	3	stazionario	6.04	15.5
0.1809	0.1904	0.5211803	0.001153	180.9	190.4	9.5	4	stazionario	6.14	12.59
0.1904	0.2019	0.56707677	0.002839	190.4	201.9	11.5	5	stazionario	11.55	12.59

**Tabella 6** - Risultati forniti dalla procedura per il profilo 1



**Fig 6.21** - Andamento del valor medio dell'RMS calcolato su una finestra di 50 punti, per le 5 tratte stazionarie individuate per il profilo 1

Sempre a titolo indicativo, vengono riportati in figura 6.22 i risultati della verifica di stazionarietà effettuata sull'accelerazione spaziale di una tratta stazionaria individuata nel profilo con il test statistico Chi-quadro. I risultati sono espressi in termini di confronto tra le distribuzioni di frequenza teorica e misurata ed in termini di diagrammi di normal-probabilità (*normal probability plot*).



**Fig. 6.22** - Risultati del test di stazionarietà: confronto tra le frequenze teoriche e sperimentali (a), normal probability plot (b).



E' interessante rilevare come nel grafico 6.19 b) sia possibile osservare verso la fine del profilo (intorno ai 200m) una notevole fluttuazione dei valori dell'accelerazione spaziale del profilo depurato dalle irregolarità. Coerentemente con questa indicazione, la nostra procedura ha fornito, alla fine del profilo, due tratte stazionarie di lunghezza molto ridotta, 9.5 m ed 11.5 m, che hanno inizio rispettivamente a 180.9 m e 190.4 m; questo proprio perché in quella zona non è stato possibile individuare tratte più lunghe in cui le statistiche potessero non avere scarti significativi, come appunto preannunciato dall'esame della figura 6.19 b).

Nella tabella successiva sono riportati i risultati finali delle elaborazioni per altri profili esaminati, entrambi di lunghezza di circa 200m, in cui è stato possibile pervenire addirittura a due uniche tratte stazionarie.

PROFILO 2 Lunghezza 200m; Numero irregolarità concentrate = 0 con $\Delta=10\text{mm}$										
Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	Iniziale [m]	Finale [m]	Ampiezza intervallo [m]	Numero tratte	Risultato test	$\chi^2$ calcolato	$\chi^2$ limite
0.0027	0.1306	0.217290677	0.00079	2.7	130.6	127.9	1	stazionario	11.26	16.91
0.1306	0.2022	0.245625941	0.002624	130.6	202.2	71.6	2	stazionario	10.06	15.5

PROFILO 3 Lunghezza 200m; Numero irregolarità concentrate = 0 con $\Delta=10\text{mm}$										
Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	Iniziale [m]	Finale [m]	Ampiezza intervallo [m]	Numero tratte	Risultato test	$\chi^2$ calcolato	$\chi^2$ limite
0.0027	0.1196	0.228826415	0.00074	2.7	119.6	116.9	1	stazionario	13.9	16.91
0.1196	0.2022	0.215436033	0.000429	119.6	202.2	82.6	2	stazionario	9.65	15.5

**Tabella 7** - Risultati forniti dalla procedura per il profilo 2 e 3.

Il profilo 2 e 3, per i quali non si era individuata alcuna irregolarità puntuale applicando la metodologia con un  $\Delta=10\text{mm}$ , sono stati entrambi suddivisi in due sole tratte stazionarie di lunghezze considerevoli.

Generalizzando il concetto a tutti i profili investigati, è possibile affermare che per le pavimentazioni lapidee in cubetti è possibile pervenire a sotto tratte stazionarie di lunghezza mediamente maggiore di quelle che si riescono a riscontrare per le pavimentazioni lapidee in lastricato, tranne casi puntuali come quello rilevato nell'esempio del profilo 1.

## 6.5 PROBLEMATICA DEL FUORI SCALA E RICOSTRUZIONE ARTIFICIALE DEI PROFILI TAGLIATI

Come si è già avuto modo di esporre, su pavimentazioni particolarmente irregolari, quali appunto quelle lapidee, spesso capita che il profilo esca al di fuori dell'intervallo di lettura del profilometro (+2; -18) causando così una perdita di segnale che si presenta, in quei tratti, costante. In sostanza, irregolarità eccessive non vengono lette dal profilometro, che non essendo in grado di fornire il profilo in questi tratti, restituisce una linea retta tra gli ultimi due punti buoni acquisiti.

Questo tipo di problema si presenta spesso sulle pavimentazioni lapidee che sono caratterizzate da un elevato livello di irregolarità. Si è notato però che il problema si verifica sostanzialmente in presenza di “rigonfiamenti” della pavimentazione, come se ne possono verificare in caso di rappezzi o di dentellamento, mentre invece buche, anche di notevole depressione, non causano problemi, in quanto la strumentazione è tarata in modo da avere un delta di lettura molto sbilanciato verso valori negativi.

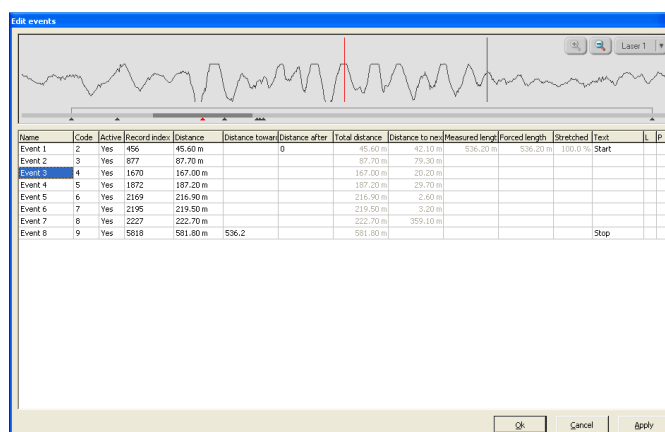
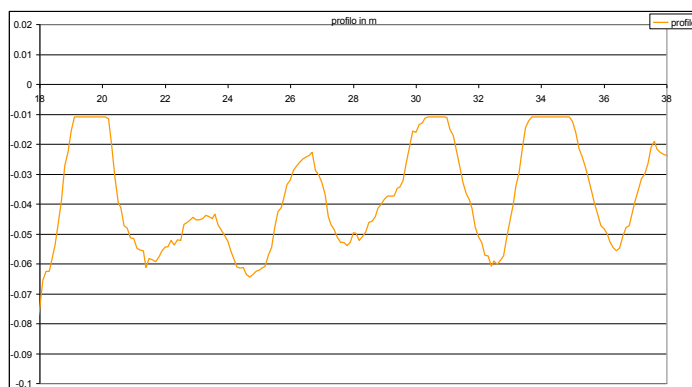


Fig. 6.23 - Tipica perdita di segnale che si registra su pavimentazioni particolarmente irregolari

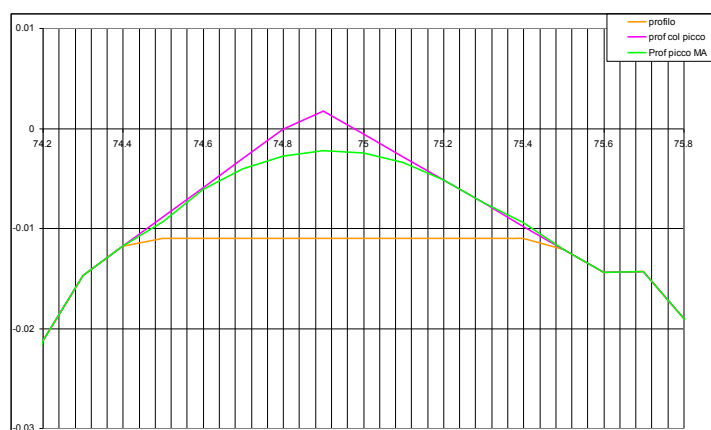
Si è quindi tentato di mettere a punto una possibile procedura con la quale si è cercato di stimare, in qualche misura, la porzione di profilo persa a causa dell'interruzione del segnale.

Per valutare la bontà della ricostruzione del profilo, bisogna necessariamente lavorare su profili in cui la perdita di segnale non si sia verificata, al fine di poter confrontare i risultati del modello con il reale profilo. Per tale motivo si è provveduto a tagliare artificialmente un profilo in modo da poter applicare la metodologia proposta, ma al contempo conservando la parte di informazione solitamente persa e che si intende stimare.



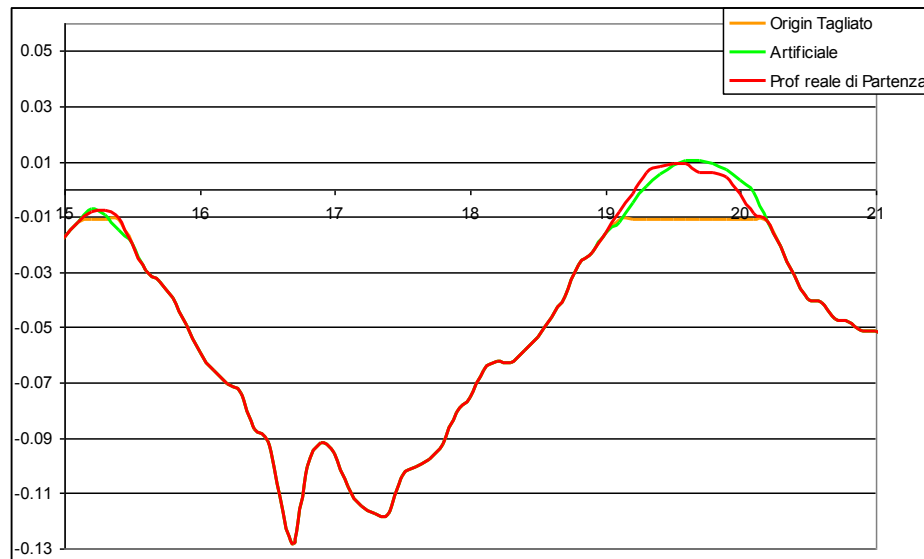
**Fig. 6.24** - Profilo tagliato artificialmente

L'algoritmo sviluppato consiste nel restituire agli intervalli interessati dai tagli una irregolarità maggiore rispetto alla retta costante che vi è riportata. L'idea è quella di simulare questa maggiore irregolarità attraverso l'intersezione tra la secante sinistra, che passa per gli ultimi due punti veri alla sinistra dell'intervallo, e quella destra che passa per i primi due punti veri alla destra dell'intervallo.



**Fig. 6.25** - Secanti all'intervallo in cui ricostruire il profilo e relativa Media Mobile

Per addolcire minimamente il profilo artificiale così ottenuto, si è poi provveduto a calcolare una media mobile del profilo con una finestra variabile pari proprio alla ampiezza dell'intervallo di ricostruzione, determinando quindi il profilo artificiale definitivo componendo il profilo originale, al di fuori degli intervalli di ricostruzione, e la media mobile del profilo con le secanti, all'interno degli intervalli di ricostruzione.



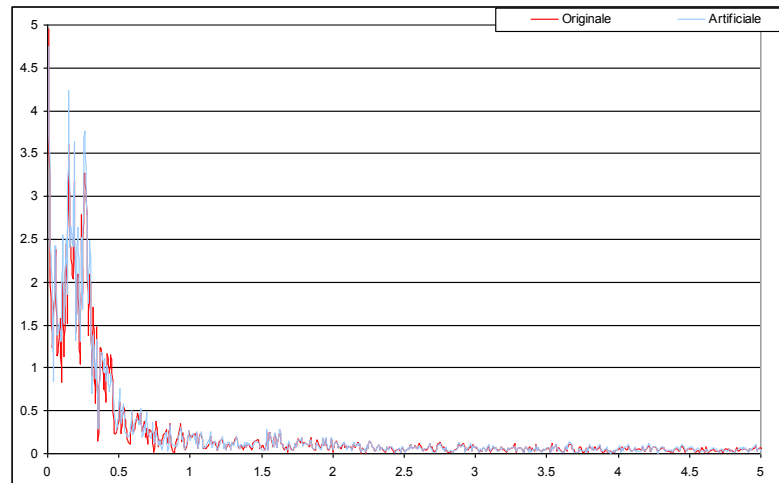
**Fig. 6.26** - Confronto tra profilo originale reale, profilo tagliato artificialmente e profilo artificiale con Media Mobile

A questo punto appare però evidente che al profilo così ottenuto si debba fornire anche un certo rumore, cioè una certa irregolarità di piccola ampiezza d'onda che al momento non risulta. Infatti la frontiera di questa irregolarità simulata è rappresentata dalle rette secanti che, proprio in quanto rette, sono prive di qualsiasi rumore.

Per cercare di valutare in qualche modo anche queste irregolarità ad alta frequenza si sono verificati due possibili approcci di seguito riportati.

### **6.5.1 PRIMO METODO DI SIMULAZIONE DI IRREGOLARITA' AD ALTA FREQUENZA**

Il primo metodo proposto si basa sul confronto tra lo spettro del profilo originale, inteso come quello tagliato (cioè quello con la presenza degli intervalli con valori di elevation costantemente pari al limite superiore di lettura del profilometro), e lo spettro del profilo artificiale con simulazione dell'incremento dell'irregolarità attraverso l'intersezione delle tangenti sinistra e destra e Media Mobile all'interno degli intervalli di ricostruzione (calcolato come esposto nel paragrafo precedente).

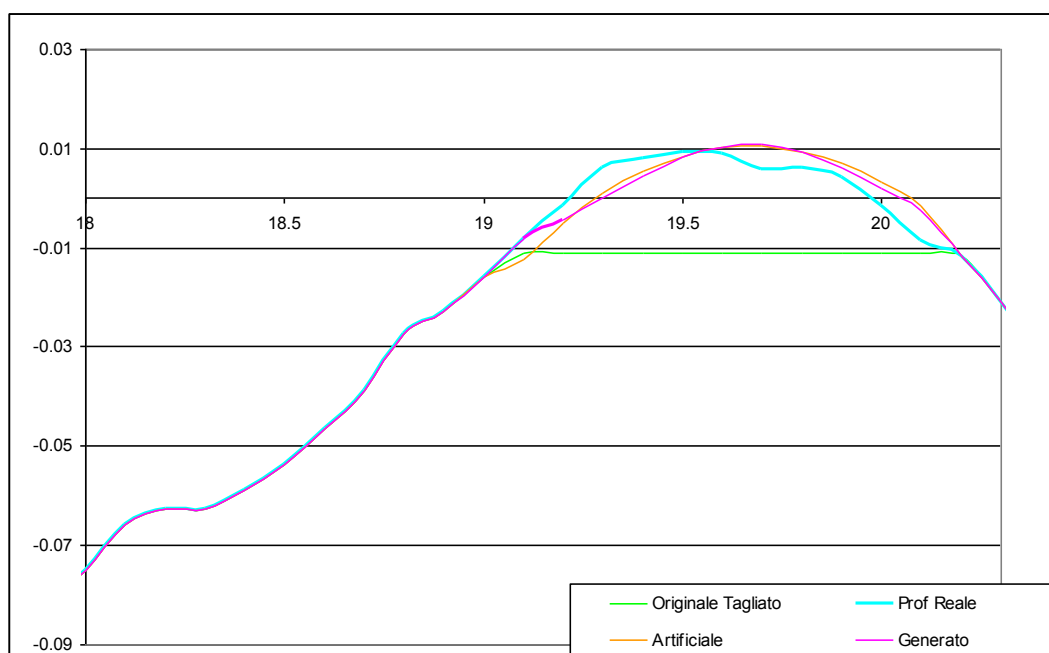


**Fig. 6. 27** - Spettro profilo originale tagliato Vs Spettro del profilo artificiale ottenuto sostituendo negli intervalli di taglio il profilo ottenuto con la media mobile del profilo con le secanti.

A questo punto si passa a costruire uno spettro fittizio composto da questi due spettri. Infatti lo spettro che ricerchiamo deve essere alle alte frequenze composto dallo spettro del profilo originale (rappresentando proprio le ampiezze d'onda che abbiamo intenzione di ricostruire) ed alle basse frequenze deve invece essere uguale allo spettro del profilo artificiale come descritto prima, in quanto vogliamo tener conto delle ulteriori ampiezze a basse frequenze (ed elevata lunghezza d'onda) che questo spettro porta con sé proprio per simulare le irregolarità che sono state tagliate.

Quindi si può individuare una frequenza di passaggio in prossimità della quale comporre lo spettro artificiale (da prendere per le frequenze che si trovano a sinistra di quella di passaggio) e quello originale (da prendere per frequenze alla destra di quella di passaggio).

Una volta individuata la frequenza di passaggio ottima, dallo spettro fittizio ottenuto come espresso prima, attraverso una anti trasformata di Fourier si può generare un profilo artificiale che andrà sostituito al profilo tagliato all'interno degli intervalli di taglio. Considerando che il nostro profilo di partenza era stato tagliato artificialmente, è stato possibile sovrapporre in un grafico il profilo reale di partenza con quello stimato attraverso una generazione artificiale, evidenziando come quest'ultimo riesca a fornire una rappresentazione sufficientemente accurata di quello reale.

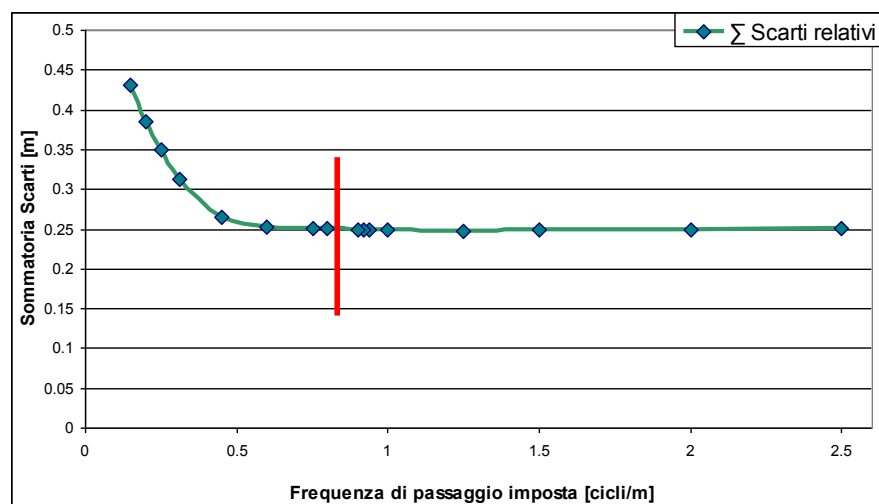


**Fig 6.27** - Confronto tra profilo originale e profilo stimato

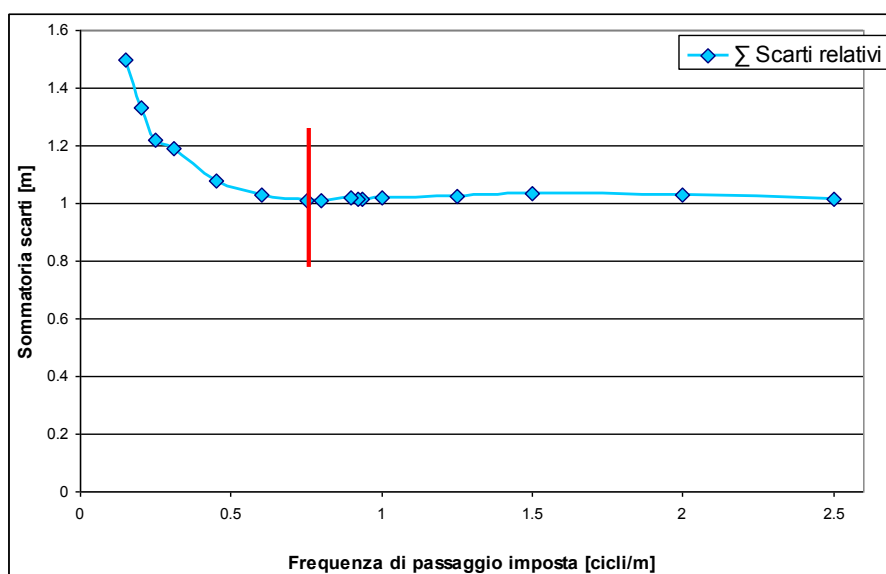
Anche per quanto concerne la scelta della frequenza di passaggio ottimale si è riusciti a fornire una procedura rigorosa per la sua individuazione. Infatti, essendo il profilo di partenza tagliato artificialmente, le vere elevations del profilo reale sono disponibili per cui è stato possibile confrontare i valori di elevazione del profilo reale con quelli del profilo stimato ottenuto attraverso la generazione artificiale di un profilo dallo spettro composito. Sono stati quindi valutati gli scarti relativi tra i due profili, calcolato come le quote del profilo reale meno le quote del profilo stimato, e si è valutato come l'indicatore sommatoria degli scarti relativi variasse al variare della frequenza di passaggio.

Si è potuto osservare che la sommatoria degli scarti relativi, dopo una certa frequenza in poi, tende a convergere verso un certo valore; per cui come frequenza di passaggio ottima si è presa la frequenza minima in corrispondenza della quale la sommatoria degli scarti relativi risulta prossima al valore di convergenza.

Il valore della frequenza di passaggio ottima varia in funzione del tipo di pavimentazione; da analisi di significatività si è potuto osservare che il valore della frequenza di passaggio può essere fissata in 0.92 cicli/m per le pavimentazioni flessibili ed in 0.75 cicli/m per le pavimentazioni lapidee (sia per quelle in lastricato che per quelle in cubetti).



**Fig. 6.28** - Individuazione della frequenza di passaggio ottima per pavimentazioni in cubetti



**Fig. 6.29** - Individuazione della frequenza di passaggio ottima per pavimentazioni in lastricato.

---

## 6.5.2 SECONDO METODO DI SIMULAZIONE DI IRREGOLARITA' AD ALTA FREQUENZA

Il secondo metodo di stima del profilo tagliato parte sempre dal profilo artificiale ottenuto come media mobile del profilo con le secanti, ma si differenzia dal primo per la metodologia con la quale si intende ricostruire su tale profilo le irregolarità di piccole ampiezze d'onda.

Infatti, il profilo stimato in questo caso si ottiene sommando al profilo artificiale con le secanti e con media mobile, quello che si ottiene moltiplicando una time history generata dalla PSD per una finestra di Hanning.

In sostanza si genera un profilo artificiale dalla PSD del profilo originale nel campo delle frequenze che vanno da:

$$f_{\min} = \frac{1}{\lambda/2}, \text{ dove } \lambda \text{ è l'ampiezza dell'intervallo da ricostruire, ad } f_{\max}.$$

Tale profilo è stato poi moltiplicato per una finestra di Hanning per essere sicuri che il profilo così ottenuto si raccordi perfettamente al profilo di partenza. Una finestra di Hanning è una funzione del tipo:

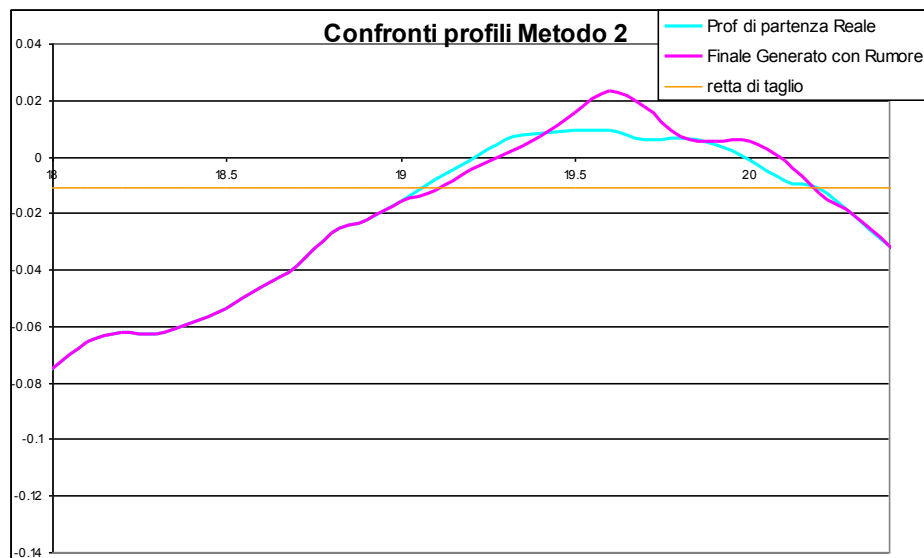
$$H = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos \frac{2\pi n}{M} \right] \text{ con } 0 < n < M$$

ed M pari al numero di campioni (finestra).

Il prodotto tra la finestra di Hanning ed il profilo generato dalla PSD è stato sommato al profilo ottenuto da quello iniziale incrementato dall'intersezione della secante destra e di quella sinistra all'intervallo da ricostruire, e del quale sia stata fatta anche una media mobile con base pari all'ampiezza dell'intervallo.

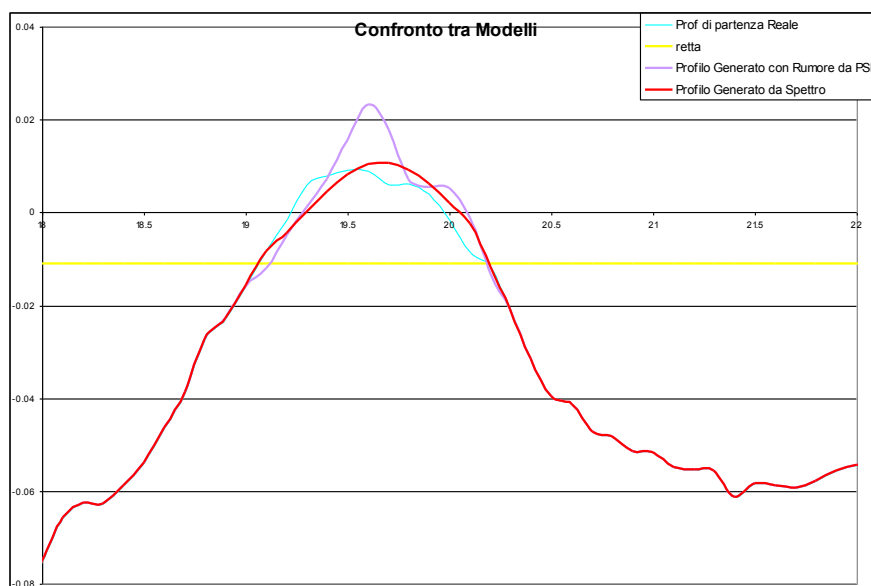
Nel grafico seguente si riporta il confronto tra il profilo stimato con la metodologia appena esposta e quello reale (disponibile perché, è bene ricordarlo, al fine della valutazione della bontà del metodo il profilo tagliato è stato ottenuto tagliando artificialmente un profilo buono).





**Fig. 6.30** - Confronto tra profilo reale e profilo stimato con il secondo metodo

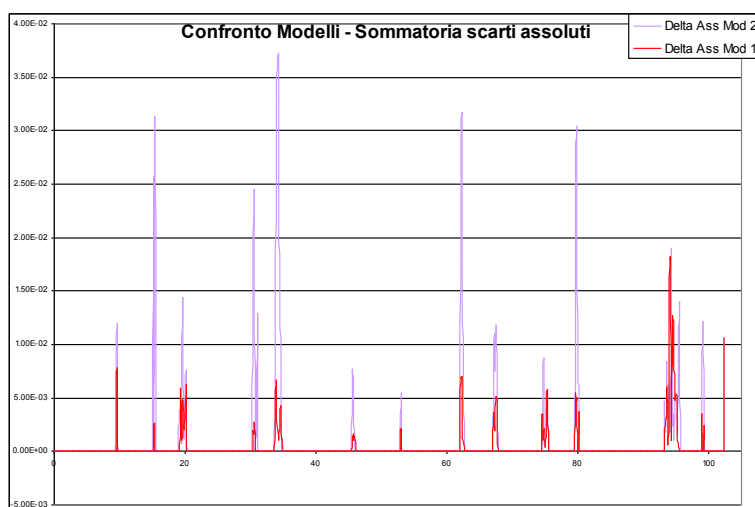
In ultimo, si sono potuti confrontare i due modelli proposti per la ricostruzione del profilo.



**Fig. 6.31** - Confronto tra profilo reale e profilo stimato con i due differenti metodi

Per valutare la bontà dei due metodi ci si è riferiti sempre all' indicatore sommatoria degli scarti relativi tra le quote del profilo reale meno le quote del profilo stimato ottenuto con i due differenti metodi. Dal grafico successivo nel quale sono riportati la sommatoria degli scarti nei due metodi, si può facilmente constatare come il primo metodo (quello con il profilo generato da uno spettro composto da quello del profilo

originale tagliato e da quello dell'artificiale con le secanti) si faccia notevolmente preferire al secondo, in quanto la sommatoria degli scarti che ne derivano sono nettamente inferiori a quelli ottenuti con il secondo metodo.



**Fig. 6.32** - Confronto tra i due Modelli in termini di sommatoria degli scarti rispetto al profilo reale di partenza.

### 6.5.3 APPLICAZIONE DEL MODELLO AI PROFILI RICOSTRUITI

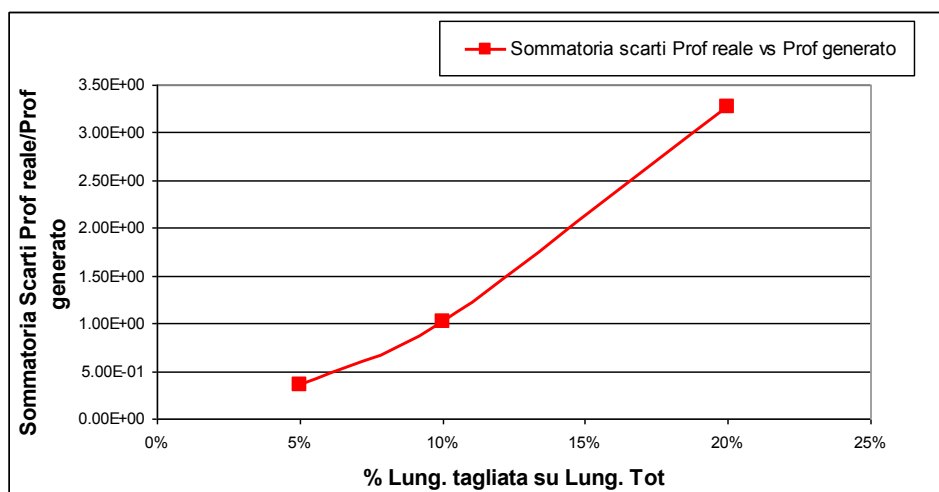
Una volta ottenuti dei profili per i quali si è riusciti a stimare il contenuto perso a causa dei fuori scala dello strumento di misura, è stato necessario applicare ad essi l'intero Modello descritto nel precedente paragrafo 6.2, per valutare se lo stesso fornisce risultati attendibili per profili ricostruiti come esposto in precedenza.

Prima di cominciare con l'implementazione del modello è però necessario soffermarsi su un ulteriore parametro che interviene in questa trattazione: la numerosità dei dati persi.

Infatti, come è facile attendersi, la questione è completamente diversa se la perdita del segnale si è registrata solo in alcuni punti del profilo oppure se è avvenuta per tratti considerevoli dello stesso. Considerato che il profilo è stato tagliato artificialmente componendo il profilo reale disponibile con una retta di taglio, è stato possibile simulare, per uno stesso profilo, differenti entità della perdita di segnale. In sostanza, la retta di taglio è stata progressivamente abbassata in modo da provocare una crescente percentuale di lunghezza di profilo tagliato rispetto alla lunghezza totale.

Dal profilo reale di partenza si sono così costruiti tre profili artificiali: uno che presenta una percentuale di perdita di segnale pari al 5%, uno al 10% e l'ultimo al 20%.

A questi tre profili così ottenuti si è applicata la procedura di ricostruzione secondo il primo metodo (esposto nel paragrafo 6.5.1) e si è andati a valutare l'indicatore sommatoria degli scarti tra il profilo reale e quello ricostruito, calcolati per i tre profili e quindi in corrispondenza di 3 diverse percentuali di lunghezza tagliata di uno stesso profilo:



**Fig. 6.33** – Variazione della sommatoria degli scarti tra profilo reale e profilo ricostruito, all'aumentare della percentuale di lunghezza da ricostruire rispetto alla lunghezza totale del profilo.

Dall'esame della figura è possibile osservare che la sommatoria degli scarti rispetto al profilo reale tende ad aumentare in maniera esponenziale all'aumentare della percentuale di profilo tagliato. Pertanto è sicuramente possibile affermare che una percentuale di profilo da ricostruire pari al 20% appare eccessiva per fornire risultati coerenti e simili con quelli ottenuti dal profilo reale.

A questo punto si può procedere applicando il Modello del paragrafo 6.2 ai profili così ottenuti. Applicando la procedura per la localizzazione delle irregolarità puntuali al profilo da ricostruire per il 5%, si osserva che il numero di irregolarità fornite è molto prossimo a quelle rilasciate per il profilo di partenza e, soprattutto, sono localizzate negli stessi punti (sostanzialmente differenze sono presenti solo per quanto riguarda l'intorno della irregolarità). Procedendo con l'implementazione della procedura a questo profilo si perviene a risultati del tutto simili a quelli ottenuti per il profilo reale di partenza.

Concentrandoci ora sul profilo con percentuale di ricostruzione pari al 10%, si è riscontrato che anche per esso il numero di irregolarità individuate dalla procedura è simile a quelle ottenute per il profilo reale di partenza, però esse sono localizzate in posizioni essenzialmente diverse.

Infatti procedendo con l'applicazione del metodo dicotomico, si perviene ad una serie di sotto tratte omogenee che però non verificano unanimemente il test di stazionarietà; e non si riesce a pervenire ad una configurazione di tratte tutte stazionarie neppure se si utilizza il valore minimo consentito per  $N_{min}$ .

E' stato quindi necessario abbassare il valore di  $\Delta$  (portandolo a 7 mm) per l'individuazione delle irregolarità, osservando che il numero delle stesse risultava di poco superiore a quelle individuate per il profilo di partenza a parità di  $\Delta$ . Rispetto al caso precedente di  $\Delta = 10\text{mm}$  si è però notato una migliore congruenza tra la localizzazione delle irregolarità del profilo ricostruito e di quello reale.

Proseguendo con l'applicazione del modello, questa volta è possibile pervenire ad una configurazione che seziona il profilo in tratte che sono tutte stazionarie, ma che si presentano in numero maggiore di quelle individuate per il profilo reale:

Km iniziale	Km finale	Media	Varianza	Iniziale [m]	Finale [m]	Ampiezza intervallo [m]	Numero tratte	X <sup>2</sup> calcolato	X <sup>2</sup> limite
0.0027	0.0123	0.520614	0.002015	2.7	12.3	9.6	1	5.82	12.59
0.0123	0.0217	0.50296	0.001575	12.3	21.7	9.4	2	12.51	12.59
0.0217	0.0471	0.312819	0.000898	21.7	47.1	25.4	3	8.91	14.06
0.0471	0.0631	0.45465	0.003359	47.1	63.1	16	4	5.54	12.59
0.0631	0.0879	0.385473	0.000904	63.1	87.9	24.8	5	10.42	14.067
0.0879	0.1013	0.426109	0.000409	87.9	110	22.1	6	12.048	14.06
0.11	0.1231	0.405371	0.00019	110	123.1	13.1	7	8.44	12.59
0.1231	0.1364	0.395789	0.000828	123.1	136.4	13.3	8	12.03	12.59
0.1364	0.1529	0.405851	0.001404	136.4	152.9	16.5	9	7.64	12.59
0.1529	0.1683	0.286763	0.001297	152.9	168.3	15.4	10	3.83	12.59
0.1683	0.1734	0.451616	0.000617	168.3	173.4	5.1	11	6.34	11.07
0.1734	0.179	0.35018	0.001363	173.4	179	5.6	12	10.59	11.07
0.179	0.1841	0.437	0.002928	179	189.4	10.4	13	3.11	12.59

**Tabella 8** - Risultati forniti dalla procedura per il profilo 1 con un  $\Delta=7\text{mm}$ .

Questi risultati vanno confrontati con quelli dello stesso profilo privo di tratti da ricostruire, riportati nella precedente tabella 3. Come già si è detto, il numero di tratte stazionarie individuate è maggiore rispetto al caso dei profili non tagliati, ma è possibile riscontare una certa congruenza tra i punti di frontiera, cioè si incontra una similitudine tra le ascisse dei punti di passaggio tra una classe ed un'altra, che ci fanno comunque credere che una percentuale di lunghezza da ricostruire pari al 10% possa essere tollerata, anche se non è preferibile andare oltre la percentuale del 5%.

---

## CAPITOLO VII

### *APPLICAZIONI*

#### **7.1 CALCOLO DELLE PSD DELLE SOTTO TRATTE STAZIONARIE**

Il Modello evoluto descritto nel capitolo precedente, consente di rappresentare in maniera completa la regolarità delle pavimentazioni lapidee, fornendo così delle solide basi per ulteriori ragionamenti e approfondimenti.

In particolare, con questo modello siamo riusciti ad individuare delle sezioni in cui il processo aleatorio del quale il profilo rilevato risulta essere una funzione campione, possa ritenersi stazionario. La validazione di questa ipotesi rende possibile applicare anche alle pavimentazioni lapidee tutte quelle metodologie di rappresentazione del profilo (come quella fornita attraverso Power Spectral Density Function, PSD) che si fondano proprio sull'intendere il profilo rilevato come una rappresentazione di un processo stocastico stazionario (almeno in senso debole).

A questo punto è possibile calcolare, per ognuna delle sotto tratte stazionarie individuate dal modello, la funzione densità spettrale di potenza degli spostamenti verticali, che costituisce la trasformata di Fourier della Funzione di Autocorrelazione.

Ricordiamo che per un profilo stradale rilevato in maniera continua, per un definito valore di frequenza spaziale  $n$ , centrata entro una frequenza di banda  $\Delta n$ , il valore della funzione densità spettrale di potenza per l'assegnata frequenza  $n$ , è definita dall'espressione :

$$G_d(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(n, \Delta n)}{\Delta n}$$

dove  $\psi_x^2$  è il valore quadratico medio della componente del segnale alla frequenza spaziale  $n$ , entro la frequenza di banda  $\Delta n$ . Poiché il segnale non è misurato in continuo ma è opportunamente discretizzato, se la lunghezza di un profilo stradale è  $L$  e

---

l'intervallo di campionamento è B, la teorica frequenza spaziale massima è  $n_{\max} = 1/B$ , mentre l'effettiva frequenza spaziale di campionamento, nel rispetto del teorema di Nyquist, è  $n_{\text{eff}} = n_{\max}/2$  ed i valori discretizzati di frequenza spaziale,  $n_i$ , sono equamente spaziatati con intervallo di  $\Delta n = 1/L$ . Pertanto il generico valore di frequenza spaziale può essere rappresentato come  $n_i = i \cdot \Delta n$  e quindi la formula precedente può essere riscritta in forma discreta:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n} = \frac{\Psi_x^2(i \cdot \Delta n, \Delta n)}{\Delta n}$$

dove  $i$  varia tra zero e  $n_{\max}/\Delta n = N$ .

Se il profilo stradale è rappresentato attraverso una funzione di tipo armonica, di espressione:

$$\begin{aligned} y(x) &= A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi) = \\ &= A_i \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi) \end{aligned}$$

dove  $A_i$  è l'ampiezza,  $n_i$  è la frequenza spaziale e  $\varphi$  è l'angolo di fase, allora è possibile affermare che il valore quadratico medio di questo segnale armonico è:

$$\Psi_x^2 = \frac{A_i^2}{2}$$

Da questa formula si ricava quindi che la relazione tra il contenuto spettrale, ottenuto dalla trasformata di Fourier, e la PSD discretizzata di un profilo stradale, può ottenersi tramite l'espressione:

$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2 \cdot \Delta n}$$

Solitamente per il calcolo della funzione PSD degli spostamenti verticali si utilizza l'algoritmo della FFT (Fast Fourier Transform) che, a meno di un fattore di scala, fornisce una stima del modulo della DFT (Trasformata Discreta di Fourier).

L'algoritmo della FFT ha però il limite di poter essere applicato solo ad una successione di  $2^n$  punti, mentre invece dopo l'applicazione del nostro modello ad un profilo di input

---

si perviene ad un certo numero di sotto tratte stazionarie di lunghezza del tutto arbitraria. Per tale motivo, per il calcolo della funzione PSD si è dovuto utilizzare l'algoritmo della CFFT (Trasformata di Fourier Complessa) che va impiegata quando il dominio da trasformare è complesso oppure quando il vettore dei dati non ha  $2^n$  elementi. Infatti l'ipotesi di applicabilità della trasformata complessa è che il dominio da trasformare sia composto da un numero pari di punti.

Alcuni programmi di calcolo matematico hanno implementato un algoritmo per il calcolo della trasformata complessa fornendo però due trasformate, la cfft e la CFFT, che si differenziano solo per un fattore di scala e per il segno convenzionale.

cfft(A):

$$c_j = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_k v_k e^{i(\frac{2\pi}{n})k}$$

CFFT(A):

$$c_j = \frac{1}{n} \sum_k v_k e^{i(\frac{2\pi}{n})k}$$

dove n è il numero di punti.

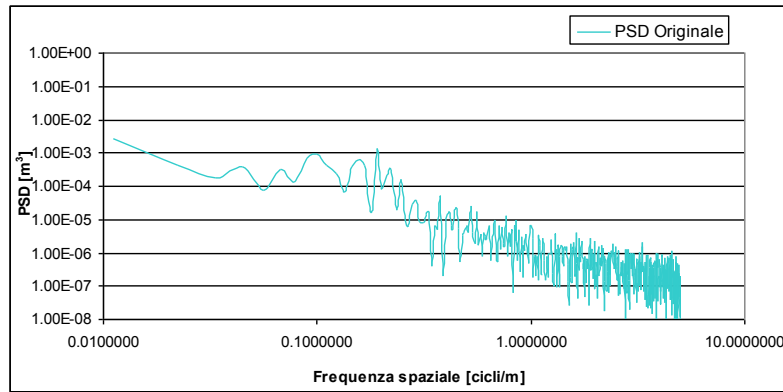
La CFFT e la cfft, oltre che per il fattore di scala, si differenziano per il segno, infatti risultano essere una la coniugata dell'altra (cioè hanno stesso segno della parte reale e segno opposto per la parte immaginaria); quindi per i nostri calcoli utilizzeremo la CFFT che fornisce segni identici all'operatore FFT.

Tuttavia la CFFT differisce dalla FFT per un fattore di scala, infatti:

$$\text{FFT} = \text{CFFT} * n$$

Per cui, per ottenere la FFT una volta calcolata la CFFT è necessario moltiplicarla per il numero di punti. In questo modo siamo in grado di calcolare lo spettro di profili di qualsiasi grandezza, al massimo eliminando un punto per ricondurci al caso di una successione di un numero pari di punti.

Nella figura seguente è riportato, a titolo d'esempio, il grafico della funzione PSD degli spostamenti verticali di un profilo di lunghezza pari a 89.9 m, calcolata quindi su 898 punti (assunto il passo di campionamento pari a 10cm):



**Fig. 7.1** – PSD di un profilo di un numero pari di punti, calcolata con l’algoritmo della CFFT.

### 7.1.1 PROPOSTA DI MODIFICA ALL’ALGORITMO DI CALCOLO DELLA PSD SMOOTHED DELLA NORMA ISO 8608

Come abbiamo già avuto modo di esporre in precedenza, quando la funzione PSD è calcolata per via discreta con larghezza di banda costante, la sua rappresentazione in un diagramma bilogaritmico evidenzia una forte fluttuazione alle alte frequenze, generata dalla reale distribuzione della potenza e dal “rumore” statistico.

Per tali ragioni, la norma ISO 8608 prevede di rappresentare la funzione PSD in una forma “smussata” (operazione di smoothing), calcolandone la media in diverse bande: in bande di ottava, in bande di terzi di ottava ed in bande di dodicesimi di ottava.

La media della PSD per ogni assegnata banda può essere calcolata attraverso la seguente espressione:

$$G_S = \frac{(n_L + 0.5)B_e - n_l}{n_h - n_l} G(n_L) +$$

$$+ \frac{1}{n_h - n_l} \sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j)B_e +$$

$$+ \frac{n_h - (n_H - 0.5)B_e}{n_h - n_l} G(n_H)$$

dove:



$$n_L = \text{Int}\left(\frac{n_l}{B_e} + 0.5\right)$$

$$n_H = \text{Int}\left(\frac{n_h}{B_e} + 0.5\right)$$

$n_h$  ed  $n_l$  sono rispettivamente l'estremo superiore e quello inferiore della specifica banda rispetto alla quale si sta calcolando il valore medio della PSD;  $B_e$  rappresenta l'intervallo di campionamento del profilo.

Una volta che la PSD è stata smussata risulta possibile operare una regressione lineare in un sistema di riferimento bi-logaritmico mediante l'espressione:

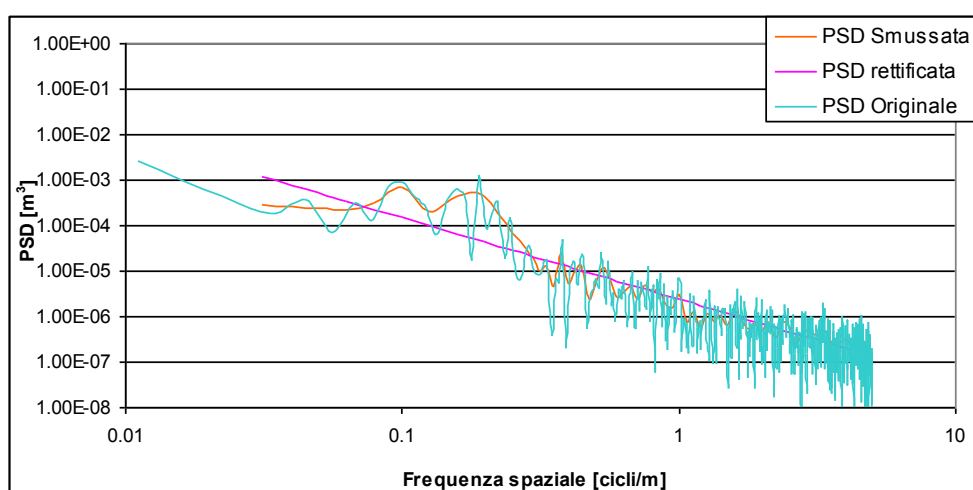
$$\text{Ln}(Gs) = a + b\text{Ln}(n)$$

che nel sistema di riferimento normale diviene:

$$Gs = e^a n^b$$

dove  $a$  e  $b$  rappresentano le costanti della regressione ricavata sperimentalmente.

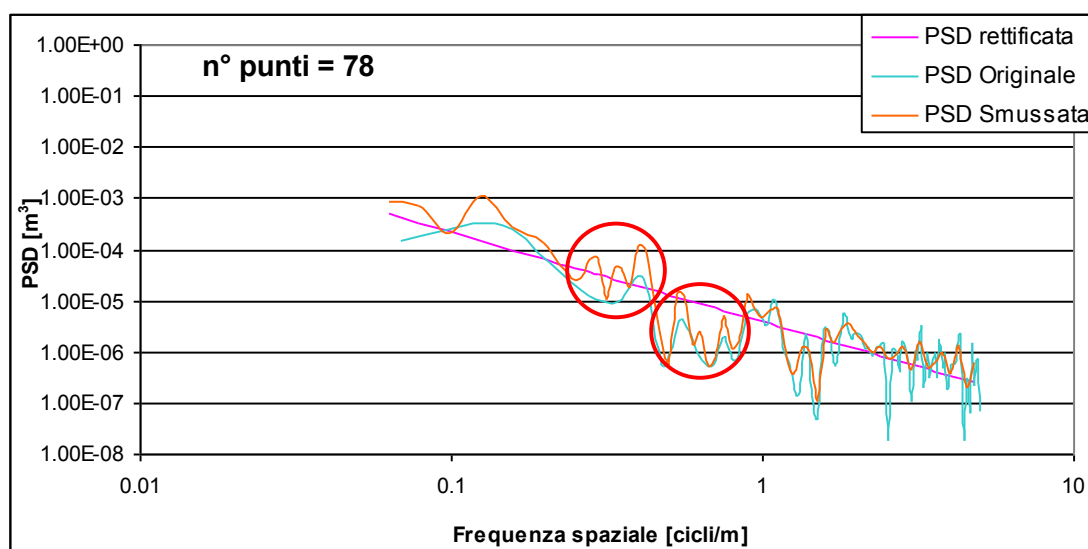
A titolo di esempio si riporta, per lo stesso profilo utilizzato in figura 7.1, il grafico della funzione PSD smussata secondo norma ISO 8608 e la relativa regressione:



**Fig. 7.2** – PSD smussata e regressione lineare della PSD smussata per un profilo di una pavimentazione in cubetti

L'espressione fornita dalla norma ISO per il calcolo della PSD smussata, in sostanza non fa altro che andare a valutare una media dei valori della funzione PSD calcolata nei punti che cadono all'interno dell'intervallo  $[n_l(i) ; n_h(i)]$ . In particolare il secondo termine fornisce la media della funzione PSD della nuvola di punti che cadono interamente dentro l'intervallo di calcolo, mentre il primo ed il terzo termine servono per valutare i contributi di bordo (estremo sinistro ed estremo destro).

Applicando però la formula proposta dalla ISO 8608 al caso di profili particolarmente corti, è subito balzato agli occhi una incongruenza. Infatti, come si potrà notare dall'esame della figura successiva, calcolando la PSD smussata per un profilo lungo appena 7.8 m (discendente dalla suddivisione in tratte stazionarie di un profilo non stazionario) si presentano dei picchi indesiderati nel grafico della PSD smoothed che tende quindi a discostarsi, ingiustificatamente, dalla PSD originaria del profilo. Tale anomalia, ovviamente, ha ripercussioni anche sul calcolo della regressione della PSD smussata.

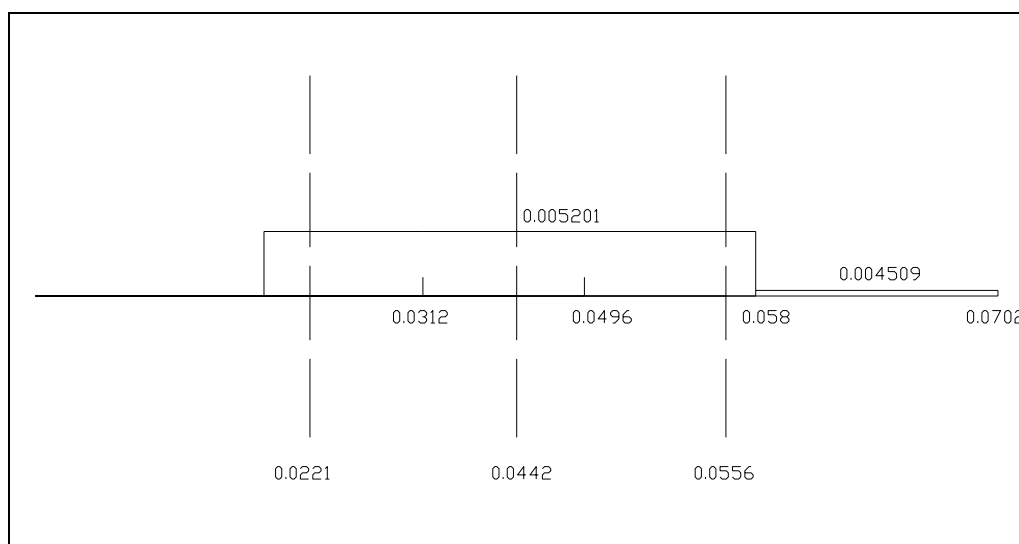


**Fig. 7.3** – PSD smussata e regressione lineare della PSD smussata per un profilo di una pavimentazione in cubetti di lunghezza = 7.8m , con cerchiare in rosso le incongruenze tra PSD originale e smoothed secondo ISO 8608.

Da una analisi estesa effettuata su tutte le sotto tratte stazionarie individuate dal modello descritto nel capitolo 6, si è potuto rilevare che questa problematica si manifesta sempre quando si ha a che fare con profili di lunghezza ridotta e la discordanza della PSD smussata dalla PSD originaria è evidente alle basse frequenze (fino ad un massimo di 1 ciclo/m), mentre alle alte frequenze la smussata pare approssimare bene la PSD originale.

Si è osservato che la formula fornita dalla norma ISO 8608, funziona in maniera ottimale se all'interno dell'intervallo  $[n_l(i) ; n_h(i)]$ , cade una nuvola di punti, mentre invece i risultati sono imprecisi se all'interno di tale intervallo cade un unico punto oppure nessuno, condizione che si manifesta per profili di lunghezza limitata.

Infatti, la formula non fa altro che proporre una media integrale dei valori della funzione PSD,  $G_s(i)$ , calcolati nelle frequenze centrali  $n_c(i)$  che si trovano all'interno dell'intervallo  $[n_l(i) ; n_h(i)]$  (indicato tra le due linee tratteggiate nel grafico sottostante). Come si capisce dalla figura 7.4, quando all'interno dell'intervallo investigato cade un solo punto (ad esempio quello con frequenza centrale 0.0312 che è l'unico che cade all'interno dell'intervallo  $[0.0221; 0.0442]$ ), il valore della media integrale dovrebbe essere pari proprio al valore di  $G(n_L)$  (pari a 0.005201 nella figura).



**Fig. 7.4** – Situazione del calcolo della PSD smussata in un caso in cui all'interno dell'intervallo di calcolo cada un solo punto.

Vediamo adesso la formula del calcolo della PSD fornita dalla norma ISO 8608 come si particolarizza per il caso in cui all'interno dell'intervallo cada un solo punto. In questo caso  $n_L$  ed  $n_H$  sono uguali, per cui la sommatoria del secondo addendo della formula (i cui estremi sono appunto  $n_L + 1$  e  $n_H - 1$ ) non interviene. Allora la formula può essere così riscritta:

$$G_s = \frac{[(n_L + 0.5)B_e - n_l(i) + n_h(i) - (n_L - 0.5)B_e]G(n_L)}{n_h(i) - n_l(i)} = \frac{[B_e + n_h(i) - n_l(i)]G(n_L)}{n_h(i) - n_l(i)}$$

da cui, semplificando:

$$G_s = \frac{B_e}{n_h(i) - n_l(i)} G(n_L) + G(n_L)$$

Abbiamo però precedentemente mostrato come in questa situazione il valore della PSD dovrebbe essere uguale proprio a  $G(n_L)$ , mentre l'applicazione pedissequa della formula della norma ISO differisce da questo valore di una quantità pari a  $\frac{B_e}{n_h(i) - n_l(i)} G(n_L)$ , che risulta essere un valore positivo e grande, in quanto il numeratore  $B_e$  è sempre molto maggiore del denominatore.

Questo è il motivo per cui se nell'intervallo di calcolo cade un solo punto (o analogamente nessuno), i valori della PSD smussata sono sempre maggiorati rispetto ai valori della PSD originaria, discostandosi molto da essa. Infatti i punti anomali cerchiati in rosso nella figura 7.3 sono riconducibili proprio a situazioni di questo tipo.

Questo problema si manifesta solo alle basse frequenze ed il numero di punti in cui si commette l'errore applicando alla lettera la formula della Norma ISO è funzione della lunghezza del profilo o, equivalentemente, del numero di punti su cui si calcola la smoothed. L'errore può essere limitato solo al primo punto, o addirittura a nessuno, per profili lunghi, e può invece investire tutti i punti fino ad una frequenza di 1 ciclo/m per profili particolarmente corti.

Generalizzando quanto esposto, è possibile individuare tre casi generali in cui necessariamente si ricade:

#### **Primo caso: all'interno dell'intervallo di calcolo cade una nuvola di punti**

In questa situazione il calcolo della PSD smussata viene effettuato applicando pedissequamente la formula proposta dalla norma ISO 8608:

$$G_s = \frac{(n_L + 0.5)B_e - n_l}{n_h - n_l} G(n_L) +$$

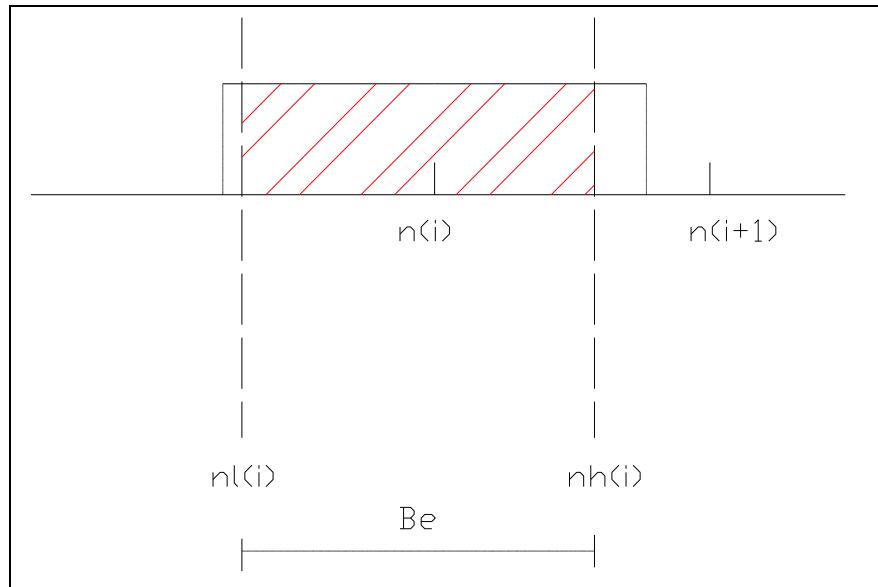
$$+ \frac{1}{n_h - n_l} \sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j)B_e +$$

$$+ \frac{n_h - (n_H - 0.5)B_e}{n_h - n_l} G(n_H)$$

**Secondo caso: all'interno dell'intervallo di calcolo cade un solo punto**

E' possibile individuare ancora due sottocasi, che portano a differenti valori di  $G_s$ .

2.a) La situazione è come quella riportata in figura:

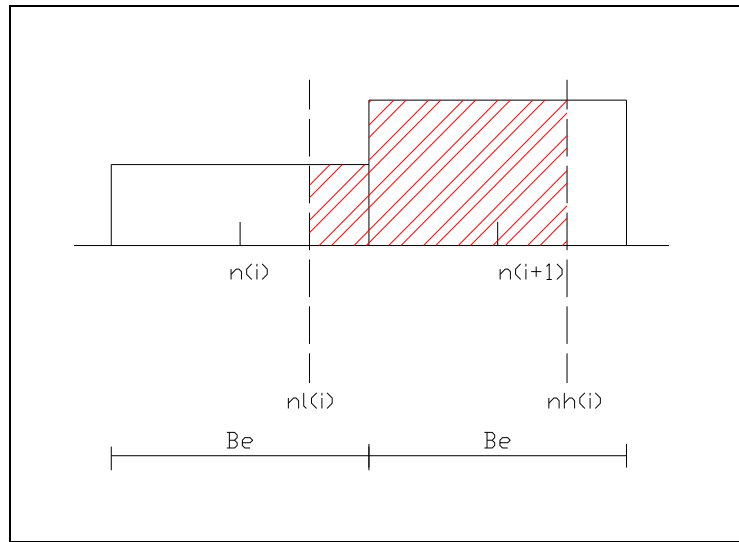
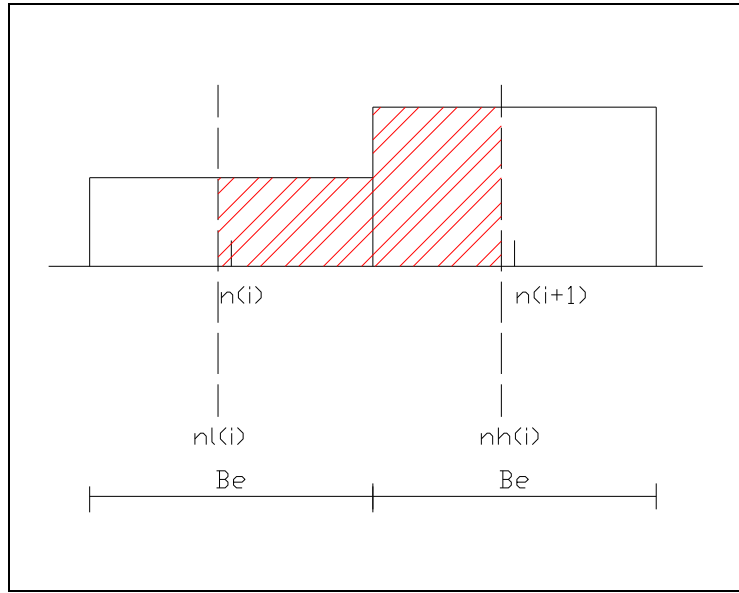


$$\text{se } n_l(i) < n_i < n_h(i) \quad \text{e} \quad n(i) + \frac{B_e}{2} > n_h(i) \quad \text{e} \quad n(i) - \frac{B_e}{2} < n_l(i)$$

allora si ha che:

$$G_s = G(n_L)$$

2.b) Se invece ricadiamo in uno dei casi riportati nella figura sottostante:



se  $n_l(i) < n_i < n_h(i)$  e  $n(i) + \frac{B_e}{2} > n_l(i)$

oppure  $n_l(i) < (n_i + 1) < n_h(i)$  e  $(n(i) + 1) - \frac{B_e}{2} > n_l(i)$

allora:

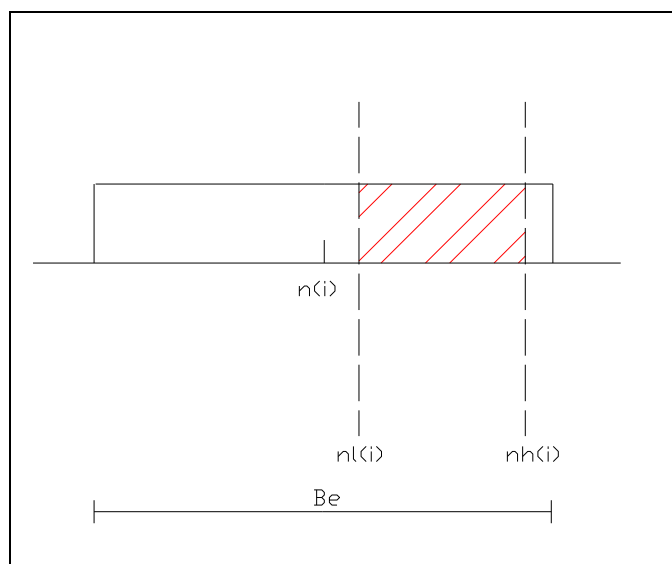
$$Gs = \frac{\left\{ G(n_L) \left[ \left( n(i) + \frac{B_e}{2} \right) - n_l(i) \right] + G(n_L + 1) \left[ n_h(i) - \left( n(i) + \frac{B_e}{2} \right) \right] \right\}}{(n_h(i) - n_l(i))}$$

---

**Terzo caso: all'interno dell'intervallo di calcolo non cade nessun punto**

Anche in questo caso è possibile individuare due sottocasi, che portano a differenti valori di  $G_s$ .

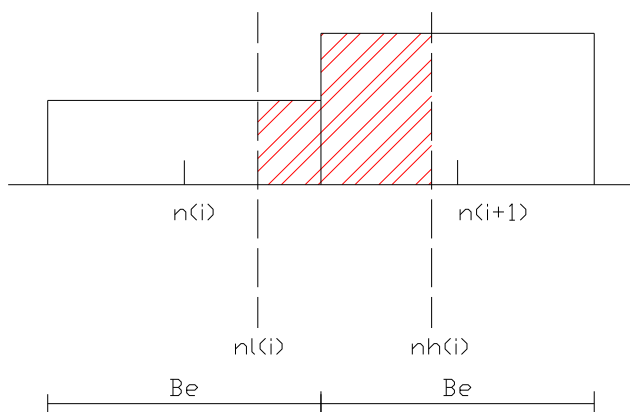
3.a) La situazione è come quella riportata in figura:



$$\text{se } n(i) < n_l(i) \quad \text{e} \quad n(i) + \frac{B_e}{2} > n_h(i)$$

$$G_s = G(n_L)$$

3.b) Se invece ricadiamo in un caso come quello riportato nella figura sottostante:



$$\text{se } n(i) < n_l(i) \quad \text{e} \quad n(i) + \frac{B_e}{2} < n_h(i)$$

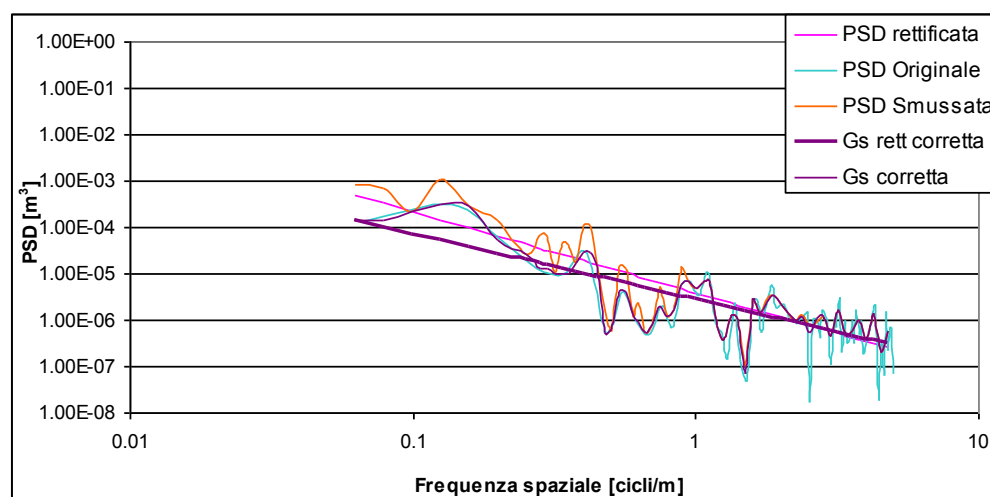
allora:

$$G_s = \frac{\left\{ G(n_L) \left[ \left( n(i) + \frac{B_e}{2} \right) - n_l(i) \right] + G(n_L + 1) \left[ n_h(i) - \left( n(i) + \frac{B_e}{2} \right) \right] \right\}}{(n_h(i) - n_l(i))}$$

E' quindi stato necessario apportare una correzione rispetto all'algoritmo di calcolo della PSD smussata proposta dalla ISO 8608, secondo gli schemi esposti di sopra.

A titolo di esempio, per lo stesso profilo utilizzato nella figura 7.3, si riporta il grafico della PSD smussata corretta confrontandola con quella cui si perviene applicando la formula della norma ISO. Le differenze tra le regressioni delle PSD smussate calcolate nei due modi sono evidenti e molto marcate:





**Fig. 7.4** – PSD smussata e regressione lineare della PSD smussata per un profilo di una pavimentazione in cubetti di lunghezza = 7.8m . Confronto tra i grafici di tali funzioni calcolate con l'algoritmo della Norma ISO 8608 o con la correzione proposta nel paragrafo 7.1.1.

Ricordiamo ancora una volta che sulla PSD smussata calcolata con la formula della ISO, alle alte frequenze non interviene nessuna correzione in quanto alle alte frequenze negli intervalli di calcolo ricadono sempre una nuvola di punti, condizione che rappresenta il regime di applicabilità della formula ISO.

La correzione interviene invece alle basse frequenze, dove si verifica che negli intervalli di calcolo cada un solo punto oppure nessuno. Dalla figura si evince subito che il grafico ottenuto con la formula corretta meglio approssima l'andamento della PSD originaria e sono spariti quelle creste verso l'alto che invece si registravano nella smoothed da formula ISO. Ancora più interessante è l'analisi delle regressioni delle PSD smussate ottenute con o senza correzione della formula. Nel primo caso la retta di regressione si trova ruotata più in basso rispetto a quella del primo caso in un dominio di maggiore regolarità secondo la classificazione ISO8608. Ciò vuol dire che non effettuando la correzione della formula ISO, alle basse frequenze si tende a sottostimare la regolarità di profili (soprattutto se particolarmente corti). Queste affermazioni sono ancora più evidenti se confrontiamo i parametri  $a$  e  $b$  delle regressioni della PSD smussata calcolata con o senza correzione della formula. Dall'esame della tabella seguente, si osserva come la correzione della formula proposta dalla norma ISO, sempre per il profilo riportato a titolo di esempio nelle figure 7.3 e 7.4, comporta una variazione del parametro  $a$  della regressione della PSD smussata pari addirittura a circa il 24%.

<b>a solo ISO</b>	<b>b solo ISO</b>
-1.751553567	-12.49413803
<b>a con correzione</b>	<b>b con correzione</b>
-1.414393602	-12.82932144
<b>var % a</b>	<b>var % b</b>
<b>23.80%</b>	<b>2.60%</b>

**Tabella 1** – Confronti tra i parametri della retta di regressione della PSD smussata, calcolata con o senza correzione alla formula proposta alla norma ISO 8608.

Da una analisi di significatività effettuata su tutte le sotto tratte stazionarie individuate con il modello esposto nel capitolo 6, si può concludere che:

- Per le pavimentazioni in cubetti la differenza percentuale del parametro *a* della retta di regressione della PSD smussata calcolata con la correzione alla formula fornita dalla Norma ISO 8608 rispetto allo stesso parametro calcolato per la regressione della PSD smussata da ISO, è pari a circa il 10%. Questa differenza in percentuale sale al 20% se la andiamo a valutare per le sole tratte di lunghezza minore di 20m. Per il parametro *b*, invece, la differenza percentuale è pari a circa lo 0.7% se calcolato su tutti i profili, e sale al 2.3% se lo si valuta per le sole tratte di lunghezza minore di 20m.
- Per le pavimentazioni in lastricato la differenza percentuale del parametro *a* della retta di regressione della PSD smussata calcolata con la correzione alla formula fornita dalla Norma ISO 8608 rispetto allo stesso parametro calcolato per la regressione della PSD smussata da ISO, è pari a circa il 12%. Questa differenza in percentuale sale al 15% se la andiamo a valutare per le sole tratte di lunghezza minore di 20m. Per il parametro *b*, invece, la differenza percentuale è pari a circa lo 1.6% se calcolato su tutti i profili, e sale al 2.6% se lo si valuta per le sole tratte di lunghezza minore di 20m.

A valle di queste considerazioni, quando nel prosieguo si sono calcolare le PSD smussate delle sottotratte stazione e le relative regressioni si è sempre effettuata la correzione all'algoritmo di calcolo proposto dalla Norma ISO 8608.

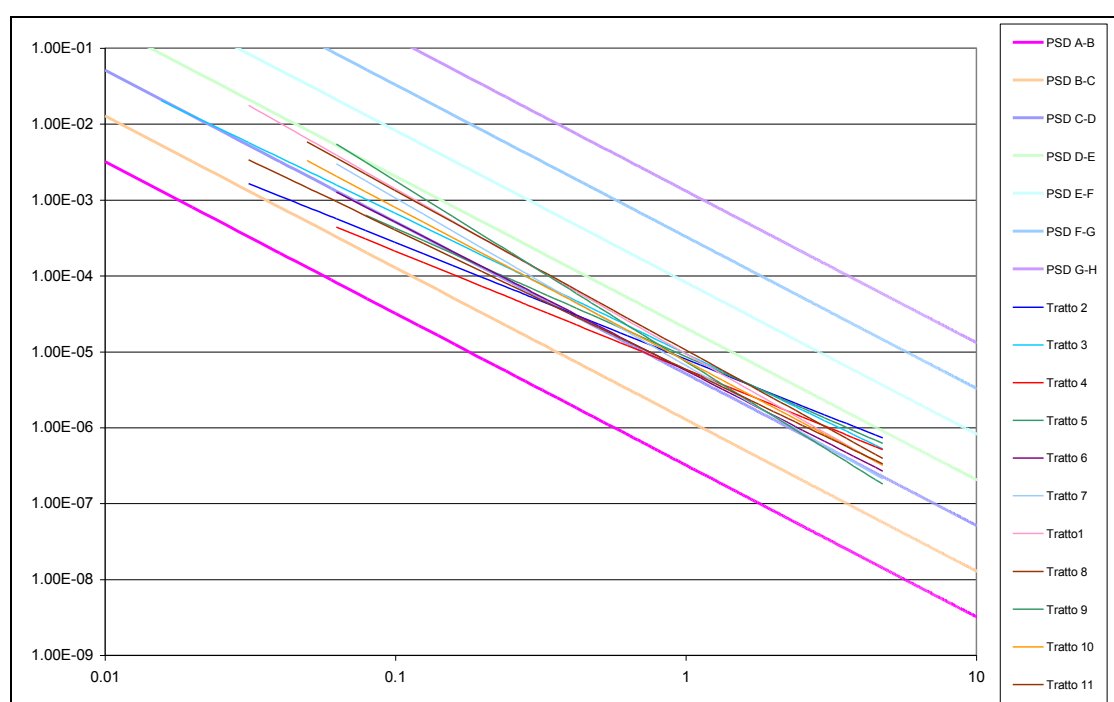
## 7.2 CLASSIFICAZIONE SPETTRALE DELLE PAVIMENTAZIONI LAPIDEE

Una volta applicato ai profili acquisiti il modello descritto nel corso del capitolo 6, delle tratte stazionarie così determinate è stato possibile calcolare la funzione PSD degli spostamenti verticali e le relative PSD smussate e regressioni delle stesse, secondo le considerazioni riportate nel paragrafo precedente. Questa rappresentazione in termini di PSD permette di trarre delle considerazioni di vario genere strettamente legate alla tipologia delle pavimentazioni.

### 7.2.1 CLASSIFICAZIONE SPETTRALE DELLE PAVIMENTAZIONI IN LASTRICATO

Per ognuno dei profili disponibili sono stati calcolate le funzioni PSD smussate e le relative regressioni.

Nel Grafico seguente sono riportate tutte le regressioni delle PSD smussate delle undici tratte stazionarie individuate per un profilo in lastricato della lunghezza di circa 200m:

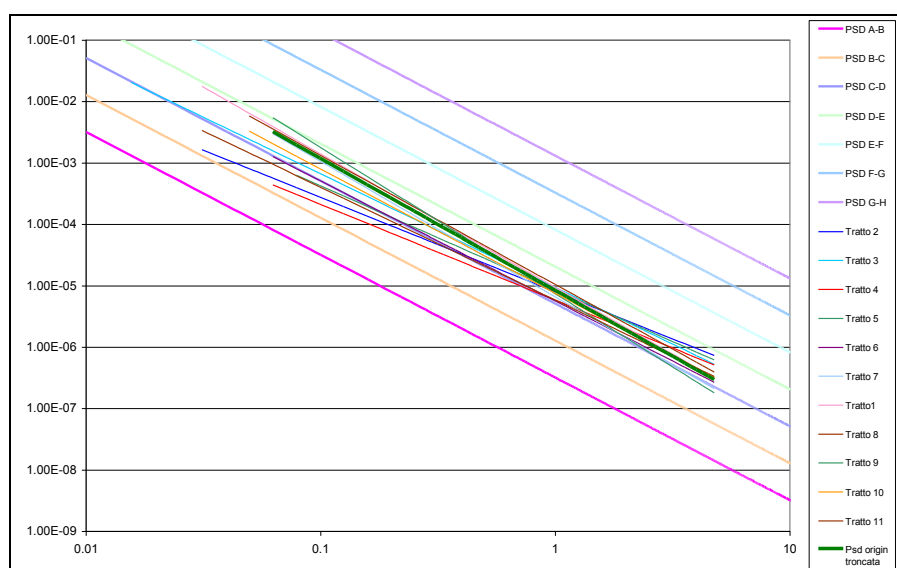


**Fig. 7.5** – Confronti tra le regressioni delle PSD smussate delle 11 tratte stazionarie individuate in un profilo in lastricato di 200m.

Si può notare come questi segmenti si distribuiscono come una stella di rette, che si interseca però in vari punti, con diverse pendenze ma che risultano tutte comprese tra le classi C e D della classificazione ISO.

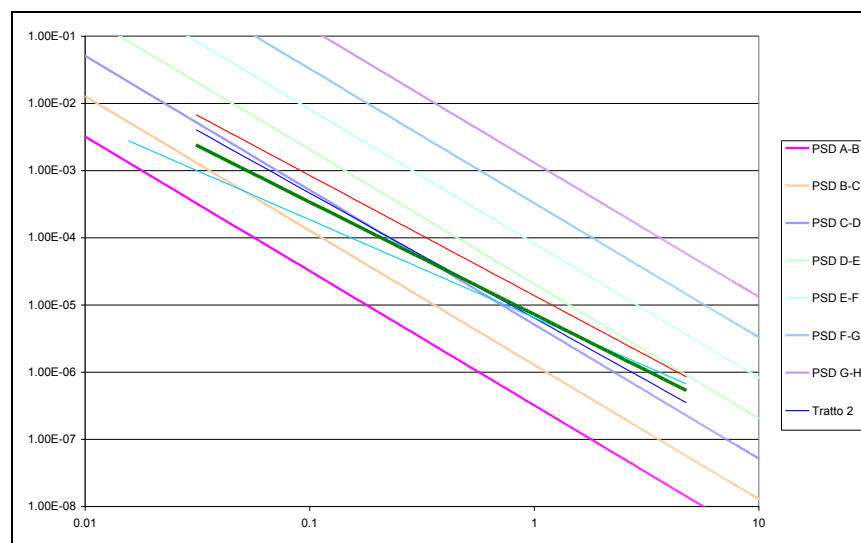
Questo fascio di rette è stato poi confrontato con la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo di partenza al quale non è stata applicata la procedura di sezionamento in tratte stazionarie e per il quale non è verificato globalmente il test di stazionarietà (denominato da ora in poi profilo “tal quale”, cioè così come fornito dal profilometro).

Le regressioni delle PSD smussate dello spostamento verticale per le sottotratte stazionarie sono calcolate tra una frequenza massima (uguale per tutte le sotto tratte stazionarie e funzione del passo di campionamento) ed una frequenza minima che è invece funzione della lunghezza della tratta stessa. Per quanto concerne invece la regressione della PSD del profilo “tal quale” è stata calcolata una regressione troncata tra la frequenza massima e la minore tra le frequenze minime delle PSD smoothed rettificate delle sotto tratte stazionarie più esterne che rappresentano gli estremi del fascio di rette della figura 7.5. Nel caso in cui la frequenza minima del segmento estremo superiore del fascio fosse molto diversa dalla frequenza minima dell'estremo inferiore del fascio, per il calcolo della regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale” si è utilizzata una frequenza minima intermedia tra le due frequenze minime degli estremi.

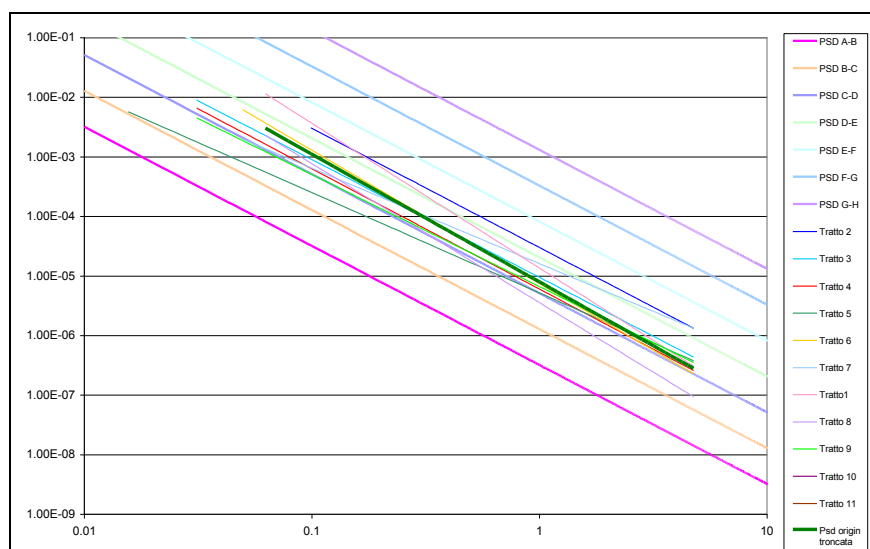


**Fig. 7.6** – Confronti tra le regressioni delle PSD smussate delle 11 tratte stazionarie individuate in un profilo in lastricato (di 200m) e la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale”.

Dall'esame del grafico delle figure 7.6, 7.7 e 7.8, si evince come per una pavimentazione in lastricato la regressione della PSD smussata delle accelerazioni verticali del profilo tal quale, ossia del profilo globale così come fornito dal profilometro e che non rispetta la verifica di stazionarietà (spessa ed in verde nei grafici), risulta essere sempre contenuta all'interno del fuso individuato dalle regressioni delle PSD smussate delle sottotratte stazionarie individuate nel profilo di partenza.

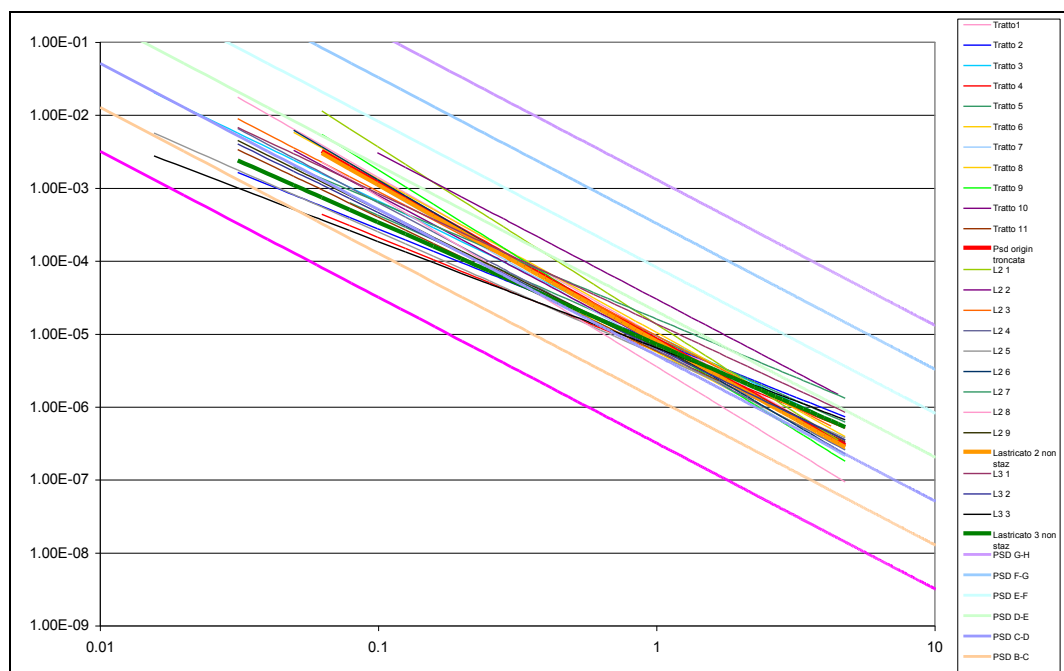


**Fig. 7.7** – Confronti tra le regressioni delle PSD smussate delle 3 tratte stazionarie individuate in un profilo in lastricato (di 100m) e la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale” (spessa in verde).



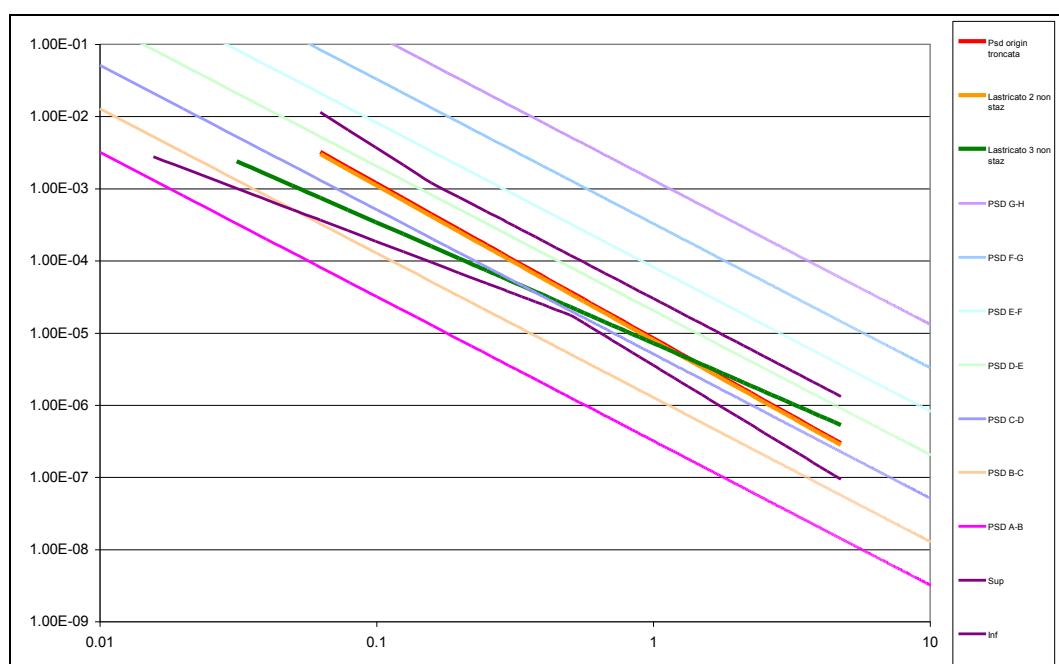
**Fig. 7.8** – Confronti tra le regressioni delle PSD smussate delle 9 tratte stazionarie individuate in un profilo in lastricato (di 200m, e diverso da quello di 7.6) e la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale” (spessa in verde).

A questo punto si sono riportate in un unico grafico tutte le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie individuate applicando la metodologia di sezionamento in tratte stazionarie ai tre profili riportati sopra e si è visto come si dispongono rispetto ad esse le regressioni troncate delle relative PSD dei profili “tal quali” (linee spesse in arancione, rosso e verde nella figura seguente)



**Fig. 7.9** - Confronto tra regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie individuate applicando la metodologia di sezionamento in tratte stazionarie a tre profili in lastricato e regressioni troncate delle relative PSD dei profili “tal quali”.

Componendo adesso le più estreme delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie, si è potuto individuare un unico fuso rappresentativo delle pavimentazioni lapidee in lastricato.



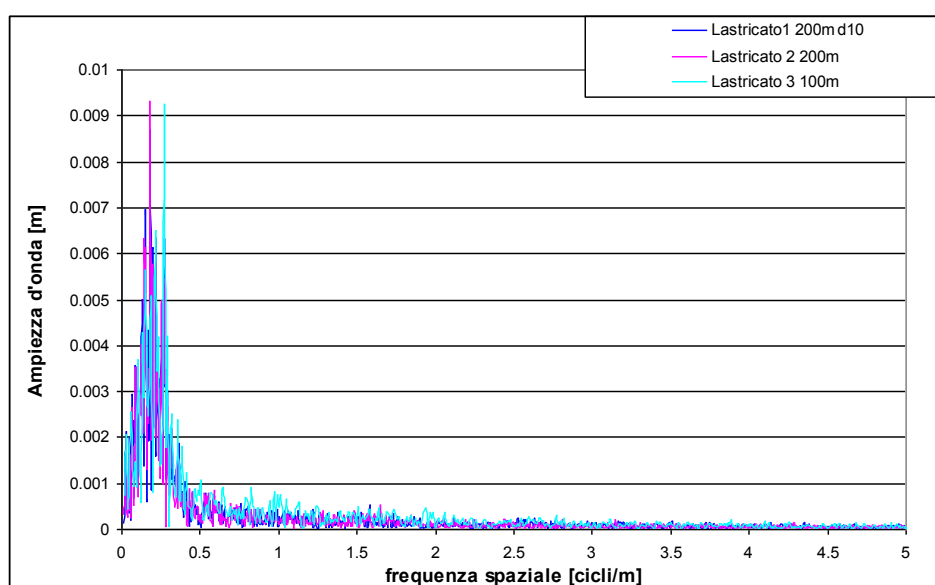
**Fig. 7.10** – Fuso rappresentativo delle pavimentazioni lapidee in lastricato e disposizione delle regressioni delle PSD smussate dei profili “tal quali”.

Le regressioni troncate dei profili “tal quali” partono sempre dall’interno del fuso e restano contenute in esso per tutte le frequenze. Quindi, per le pavimentazioni in lastricato si può affermare che la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali calcolata per il profilo “tal quale” è rappresentativa della regolarità dell’intero profilo, ma utilizzando questa invece delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle sotto tratte stazionarie si perdono delle informazioni.

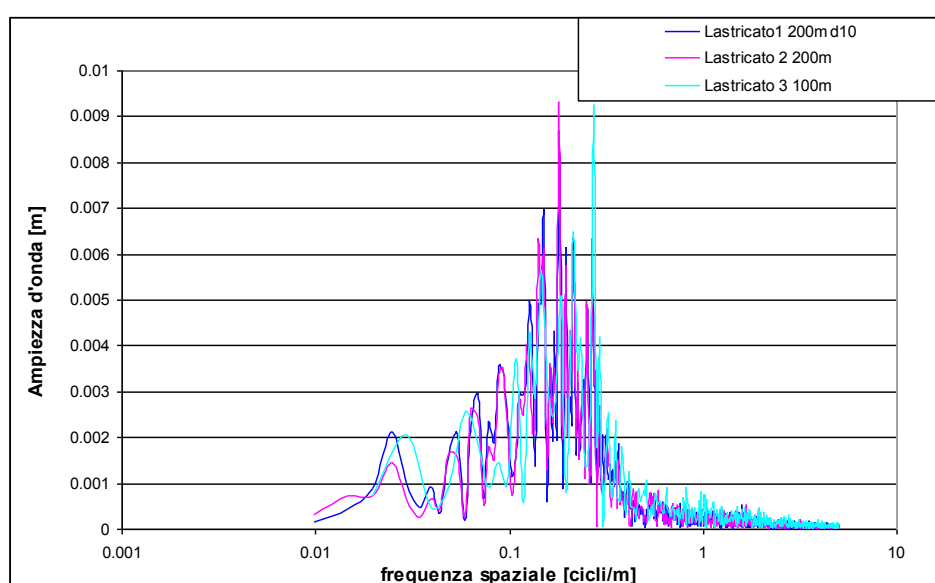
Ad esempio, ai fini della manutenzione stradale ,scomponendo il profilo investigato in sotto tratte stazionarie si possono individuare all’interno del profilo quali sono le tratte veramente problematiche ai fini della regolarità. Potrei così programmare degli interventi manutentivi mirati a quelle tratte (di lunghezza anche di pochi metri) particolarmente ammalorate, e migliorare le condizioni globali della pavimentazione almeno in termini di vibrazioni indotte, invece di portare tutta la pavimentazione al decadimento delle caratteristiche funzionali.

Viceversa, è possibile affermare che se la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali di un profilo è interna a questo fuso, la pavimentazione in questione è in lastricato.

Confrontando adesso gli spettri di diversi profili di pavimentazioni in lastricato si può osservare come il contenuto spettrale risulta essere simile tra profili differenti. Per quanto queste pavimentazioni sviluppino elevati livelli di irregolarità, questo lascia presupporre una variazioni contenute delle caratteristiche spettrali e delle statistiche dei profili di questo tipo di pavimentazioni. Inoltre si può osservare che la maggior parte del contenuto in frequenza è compreso tra 0.3 cicli/m e 0.1 cicli/m, che sono frequenze spaziali in corrispondenza delle quali si attiva il moto di oscillazione della cassa dei veicoli pesanti.



**Fig. 7.11** – Confronto tra gli spettri dei profili di tre differenti pavimentazioni in lastricato.



**Fig. 7.12** – Confronto tra gli spettri dei profili di tre differenti pavimentazioni in lastricato, con le frequenze espresse in scala logaritmica.

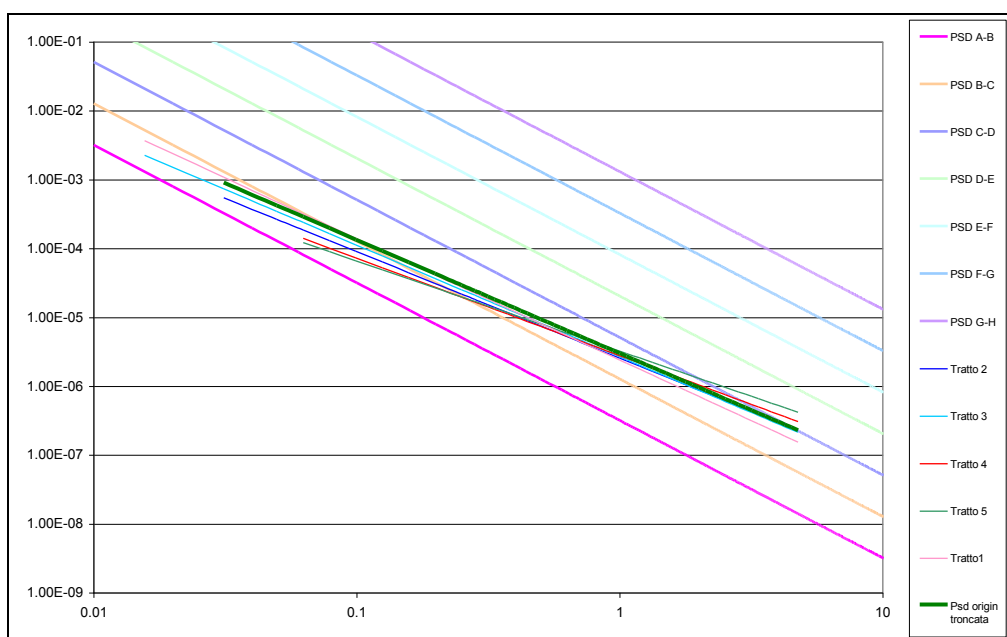


## 7.2.2 CLASSIFICAZIONE SPETTRALE DELLE PAVIMENTAZIONI IN CUBETTI

Analogamente a quanto fatto per le pavimentazioni in lastricato, anche per le pavimentazioni in cubetti per ognuno dei profili disponibili sono stati calcolate le funzioni PSD smussate e le relative regressioni.

Nel Grafico seguente sono riportate tutte le regressioni delle PSD smussate delle cinque tratte stazionarie individuate per un profilo in cubetti della lunghezza di circa 200m, e nel quale sono stata individuate 3 irregolarità puntuali applicando un  $\Delta$  di 10 mm.

Nella figura questo fascio di rette è stato confrontato con la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo di partenza al quale non è stata applicata la procedura di sezionamento in tratte stazionarie e per il quale non è verificato globalmente il test di stazionarietà (profilo “tal quale”).



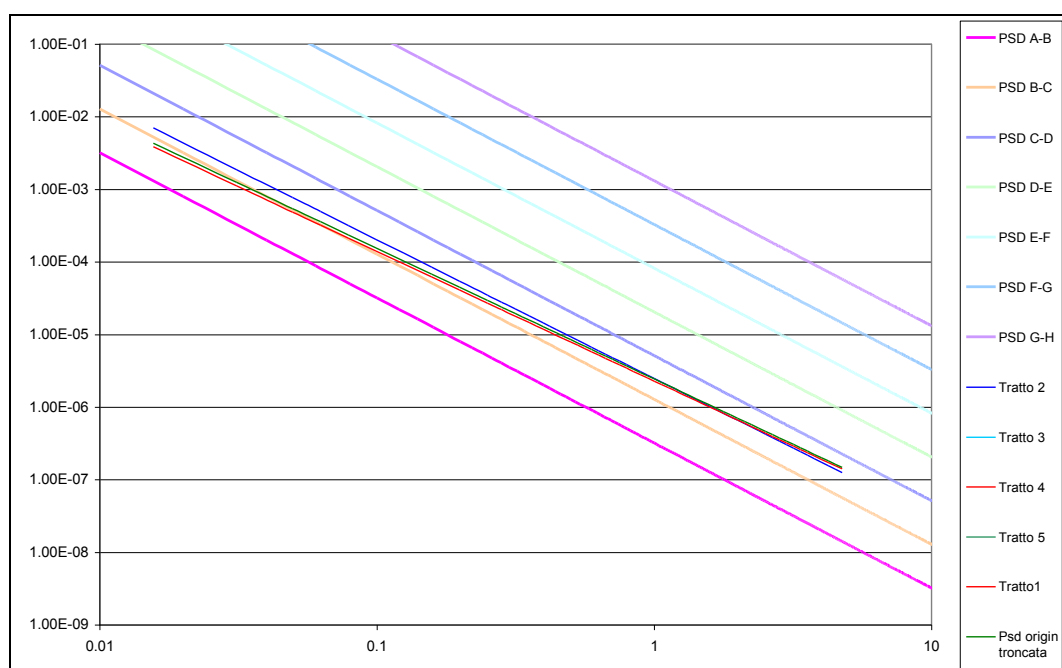
**Fig. 7.13** – Confronti tra le regressioni delle PSD smussate delle 5 tratte stazionarie individuate in un profilo in cubetti (di 200m con 3 irregolarità puntuali) e la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale”.

Anche in questo caso va segnalato che per quanto concerne la regressione della PSD del profilo “tal quale” è stata calcolata una regressione troncata tra la frequenza massima e la minore tra le frequenze minime delle PSD smoothed rettificate delle sotto tratte stazionarie più esterne che rappresentano gli estremi del fascio di rette della figura 7.13. Nel caso in cui la frequenza minima del segmento estremo superiore del fascio fosse molto diversa dalla frequenza minima dell'estremo inferiore del fascio, per il calcolo

della regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale” si è utilizzata una frequenza minima intermedia tra le due frequenze minime degli estremi.

Si può evidenziare che le regressioni delle PSD sono tutte contenute tra la classe B e D della classificazione ISO8608, e che la regressione della PSD smussata delle accelerazioni verticali del profilo tal quale (spessa ed in verde in figura), risulta essere sempre contenuta all'interno del fuso individuato dalle regressioni delle PSD smussate delle sottotratte stazionarie individuate nel profilo di partenza.

Analogamente si è ripetuta la procedura per un altro profilo di pavimentazione in cubetti sempre della lunghezza di 200m, ma per il quale l'applicazione della metodologia per localizzazione delle irregolarità puntuali impiegando un  $\Delta$  pari a 10mm non ha individuato nessun transiente.



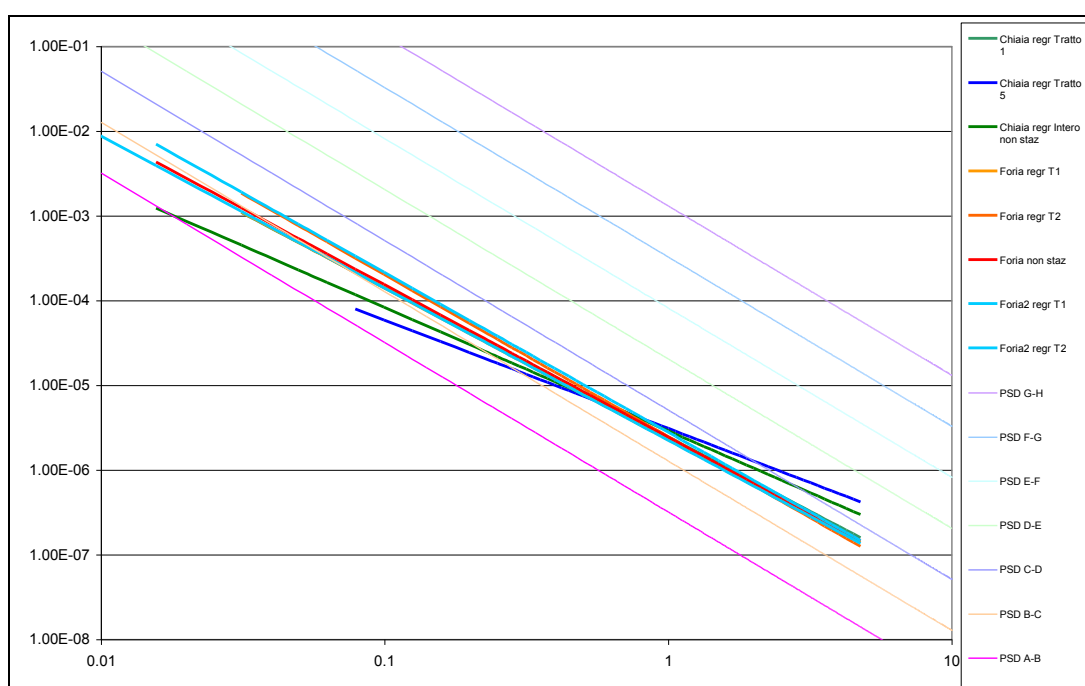
**Fig. 7.14** – Confronti tra le regressioni delle PSD smussate delle 2 tratte stazionarie individuate in un profilo in cubetti (di 200m con 0 irregolarità puntuali) e la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale” (verde).

Anche se forse non è leggibile in figura, questa volta si è verificato che la regressione della PSD smussata delle accelerazioni verticali del profilo tal quale (in verde nella figura), non risulta essere sempre contenuta all'interno del fuso individuato dalle regressioni delle PSD smussate delle sottotratte stazionarie individuate nel profilo di partenza; ma parte all'interno per poi uscirne alle alte frequenze, attingendo in

prossimità della frequenza di 1 ciclo/m circa, valori superiori a quelli del limite superiore del fuso rappresentati dalla retta più estrema tra le regressioni delle PSD rettificata delle tratte stazionarie.

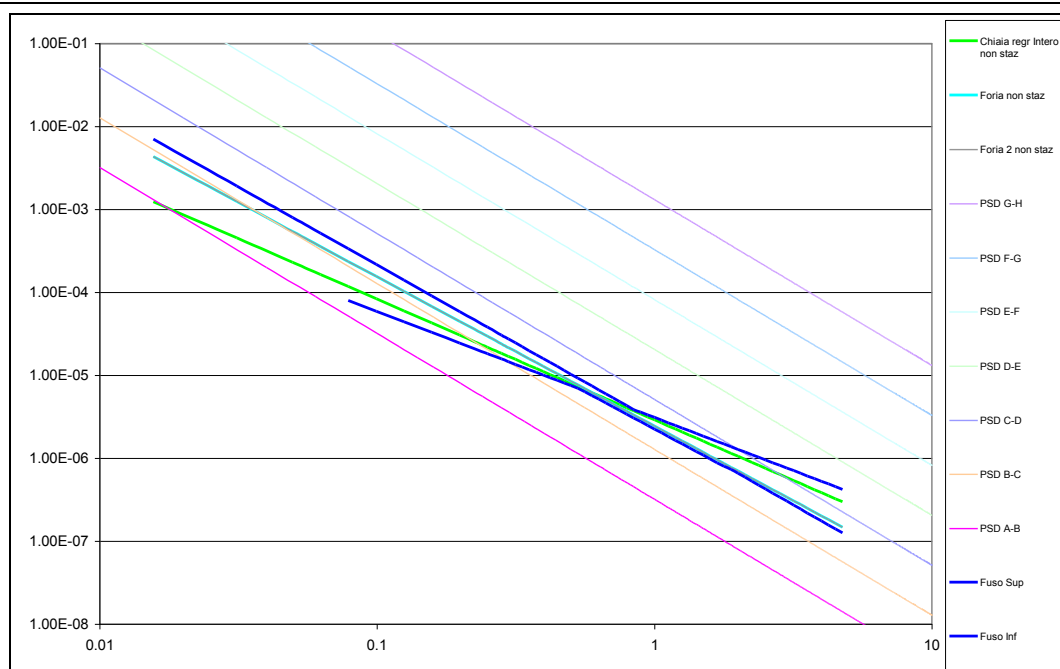
Questa tendenza della regressione della PSD smussata del profilo “tal quale” a non restare interamente nei limiti è confermata anche da altri profili di pavimentazioni in cubetti di analoga lunghezza e per i quali persista la condizione che l’applicazione della metodologia di localizzazione delle irregolarità puntuali utilizzando un  $\Delta$  pari a 10mm non abbia individuato nessun transiente.

A questo punto si sono riportate in un unico grafico tutte le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie individuate applicando la metodologia di sezionamento in tratte stazionarie a profili di pavimentazioni in cubetti, e si è visto come si dispongono rispetto ad esse le regressioni troncate delle relative PSD dei profili “tal quali” (linee spesse in rosso e verde nella figura seguente)



**Fig. 7.15** - Confronto tra regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie individuate applicando la metodologia di sezionamento in tratte stazionarie ai profili di pavimentazioni in cubetti e regressioni troncate delle relative PSD dei profili “tal quali”.

Componendo adesso le più estreme delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie, si è potuto individuare un unico fuso rappresentativo delle pavimentazioni lapidee in cubetti.



**Fig. 7.16** – Fuso rappresentativo delle pavimentazioni lapidee in cubetti e disposizione delle regressioni delle PSD smussate dei profili “tal quali”.

Le regressioni troncate dei profili “tal quali” partono sempre dall’interno del fuso globale e restano contenute in esso per tutte le frequenze.

Viceversa, è quindi possibile affermare che se la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali di un profilo è interna a questo fuso, la pavimentazione in questione è lapidea in cubetti.

Tuttavia però, se per le pavimentazioni in cubetti esaminate andiamo a confrontare la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali calcolata per il profilo “tal quale” con il rispettivo fuso di riferimento ottenuto come composizione delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali per le sotto tratte stazionarie estratte dallo stesso profilo, si osserva che la PSD del profilo “tal quale” non stazionario parte sempre dall’interno del fuso ma poi o resta sempre interno ad esso o esce fuori dallo stesso. Ciò vuol dire che alle basse frequenze la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale”, rappresenta bene la regolarità della pavimentazione, ma alle alte frequenze (oltre 1 ciclo/m, frequenza in corrispondenza della quale si verifica la fuori uscita) con la regressione della PSD smussata del profilo “tal quale” tendiamo a sottostimare la regolarità della pavimentazione. La regressione della PSD smussata del profilo “tal quale” esce fuori dal fuso (o resta tangente ad esso) solo nei casi in cui il modello per la localizzazione

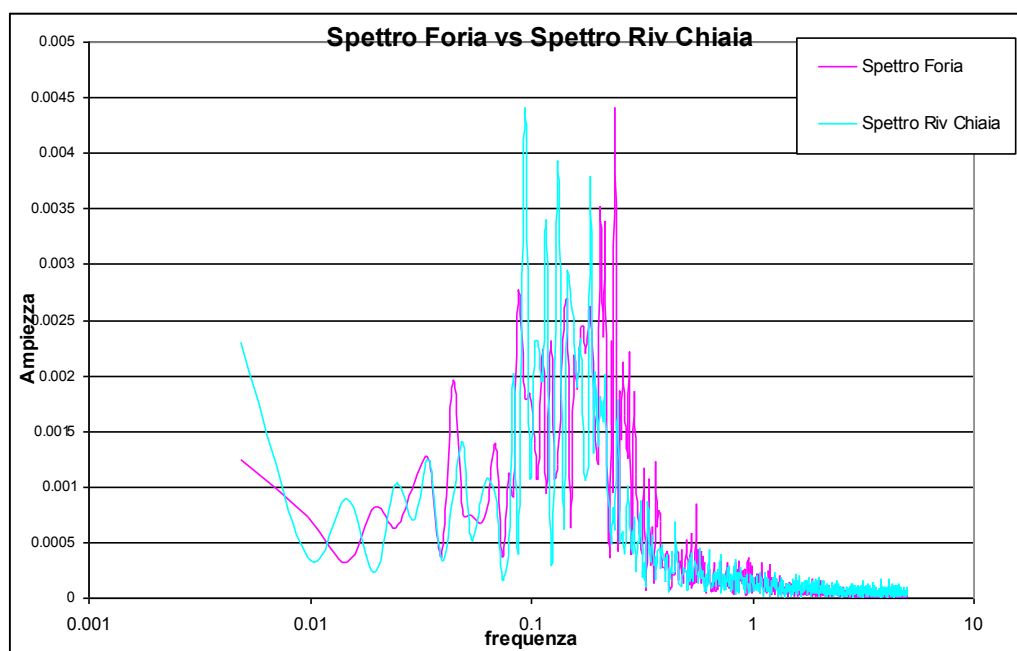
---

delle irregolarità puntuali non individua nessuna singolarità. Ciò perché la presenza (o l'assenza) di irregolarità puntuali modifica la pendenza della regressione della PSD smoothed. Quindi, se la regressione della PSD smussata "tal quale" resta interamente dentro al fuso, è proprio perché il contributo dato dalle irregolarità fa pesare di più le basse frequenze rispetto alle alte e quindi la pendenza della regressione della PSD è maggiore e tale segmento tenderà a restare all'interno del fuso.

Se invece non si registra nessuna irregolarità puntuale, la regressione della PSD "tal quale" sovrastima il contenuto in frequenza effettivo alle alte frequenze, cioè oltre 1 ciclo/m, ovvero 10 Hz, che è proprio la frequenza di oscillazione delle sospensioni. Quindi questa sovrastima ha sicuramente influenza se si vogliono condurre indagini nel campo della generazione di sovraccarichi dinamici che inducono vibrazioni all'interno dell'abitacolo del veicolo o che vengono poi trasmesse ai ricettori esterni.

Quindi, per i ragionamenti riguardanti il fenomeno delle vibrazioni, il fatto di tener conto della regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo "tal quale" rispetto a quelle delle sotto tratte stazionarie in cui è possibile sezionare il profilo, mi fa perdere la possibilità di individuare le tratte in cui si registrano maggiori generazioni di vibrazioni e le tratte in cui se ne riscontrano di meno.

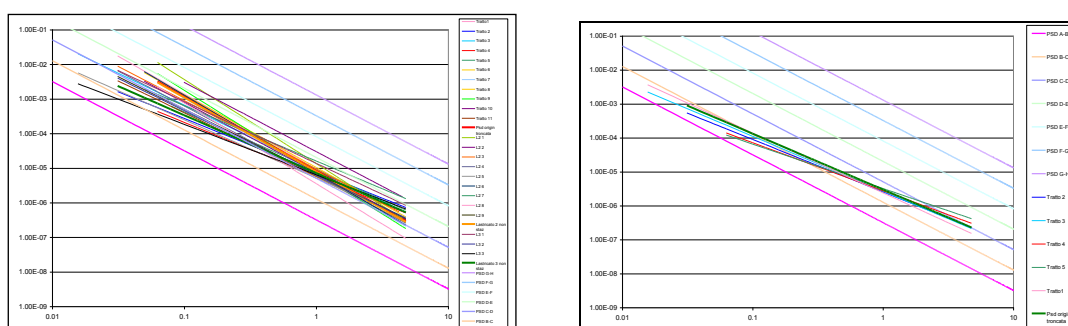
Confrontando adesso gli spettri di diversi profili di pavimentazioni in cubetti si può osservare come anche per esse il contenuto spettrale risulta essere simile tra profili differenti. Anche questa tipologia di pavimentazioni per quanto sviluppi elevati livelli di irregolarità, lascia presupporre una variazioni contenute delle caratteristiche spettrali e delle statistiche dei profili. Inoltre si può osservare che anche in questo caso la maggior parte del contenuto in frequenza è compreso tra 0.3 cicli/m e 0.1 cicli/m, che sono frequenze spaziali in corrispondenza delle quali si attiva il moto di oscillazione della cassa dei veicoli pesanti.



**Fig. 7.17** – Confronto tra gli spettri dei profili di due differenti pavimentazioni in cubetti, con le frequenze espresse in scala logaritmica.

### 7.3 CONFRONTI SPETTRALI TRA PAVIMENTAZIONI LAPIDEE IN CUBETTI ED IN LASTRICATO

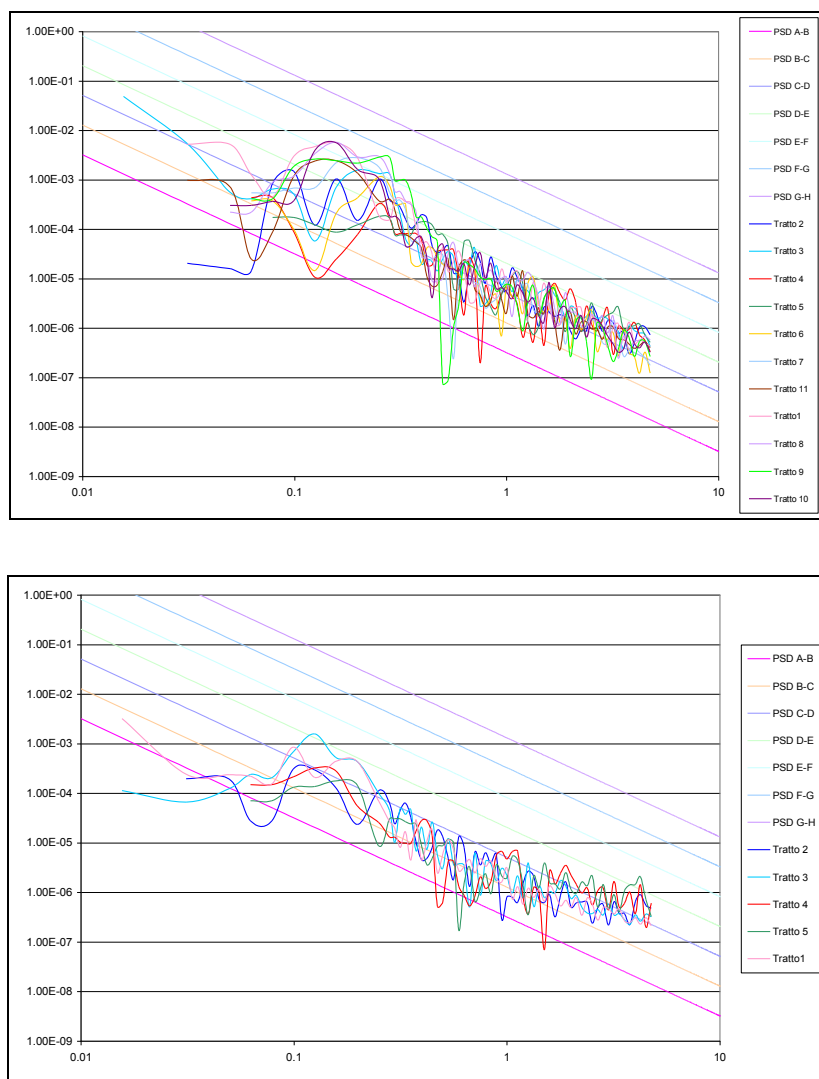
Una volta effettuata la classificazione spettrale delle differenti tipologie di pavimentazioni lapidee, è possibile effettuare dei confronti tra le stesse.



**Fig. 7.18** – Confronto regressioni PSD smussate degli spostamenti verticali di pavimentazioni in lastrico (sx) ed in cubetti (dx).

Allo scopo, in figura 7.18 riportiamo affiancati i grafici delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali per tutte le tratte stazionarie individuate per i profili di pavimentazioni in lastricato e per quelli delle pavimentazioni in cubetti.

Nella figura 7.19, invece, sono riportate le PSD smussate degli spostamenti verticali per i profili delle stesse pavimentazioni in lastricato (sopra) ed in cubetti (sotto).



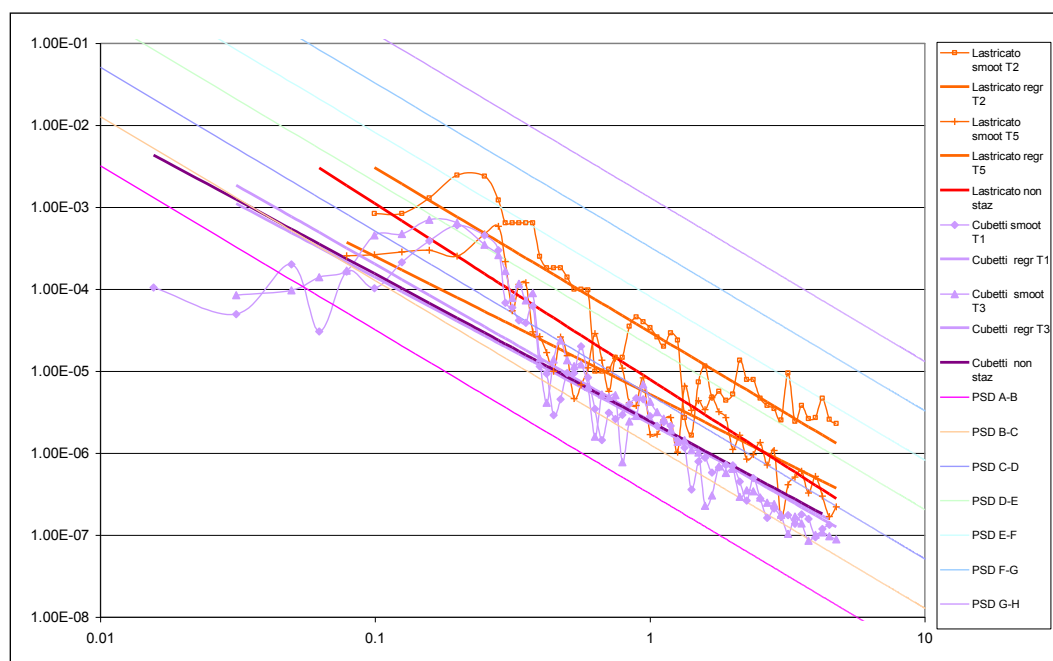
**Fig. 7.19** – Confronto PSD smussate degli spostamenti verticali di pavimentazioni in lastricato (sopra) ed in cubetti (sotto).

Dall'esame delle figure 7.18 e 7.19 si possono trarre delle considerazioni generali sulle due pavimentazioni. Le PSD smussate degli spostamenti verticali, e le relative regressioni, per le due differenti tipologie di pavimentazioni si mostrano alquanto diverse tra loro, anche se entrambe tendono ad evidenziare elevati livelli di irregolarità.

Per le pavimentazioni in lastricato, si può osservare come la maggior parte dei segmenti, rappresentativi delle regressioni delle PSD smussate delle sottotratte stazionarie, si distribuiscono tra le classi C e D della classificazione ISO 8608.

Per le pavimentazioni in cubetti, invece, le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali sono contenute maggiormente tra le classi B e C della classificazione ISO.

Nel grafico successivo sono stati messi a confronto le PSD smussate degli spostamenti verticali di alcune tratte stazionarie, le relative regressioni e la regressione della PSD smussata del profilo “tal quale”, calcolati partendo da un profilo in una pavimentazione in lastricato e di una in cubetti.

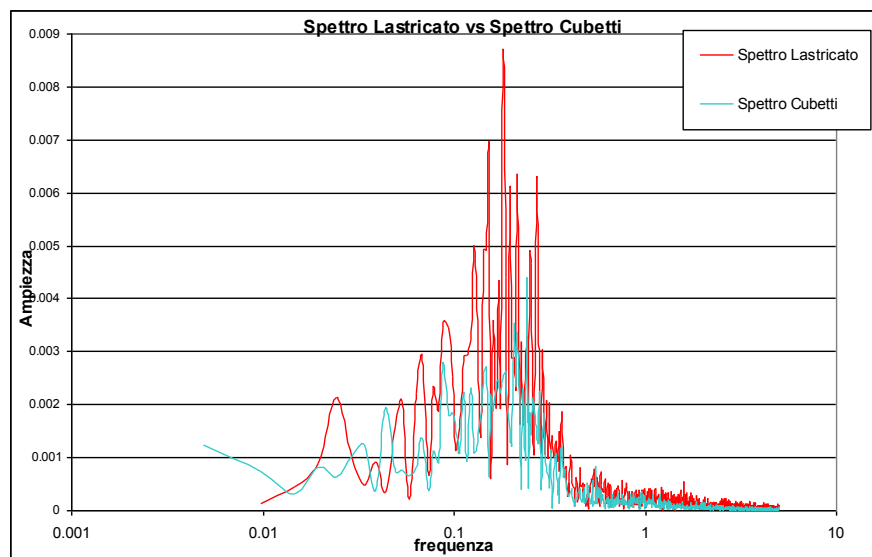


**Fig. 7.20** - Confronto tra le PSD smussate degli spostamenti verticali di alcune tratte stazionarie, le relative regressioni e la regressione della PSD smussata del profilo “tal quale”, di un profilo in lastricato (arancione e rosso) e di un profilo in cubetti (lilla e viola).

Possiamo osservare che la pavimentazione in lastricato tende ad avere una irregolarità maggiore della pavimentazione in cubetti, perché le regressioni della PSD degli spostamenti verticali del lastricato, nel grafico di classificazione dell’irregolarità della ISO 8608 si trovano più sopra di quelle dei cubetti.

Questa indicazione è confermata anche dal confronto degli spettri delle pavimentazioni in lastricato ed in cubetti:

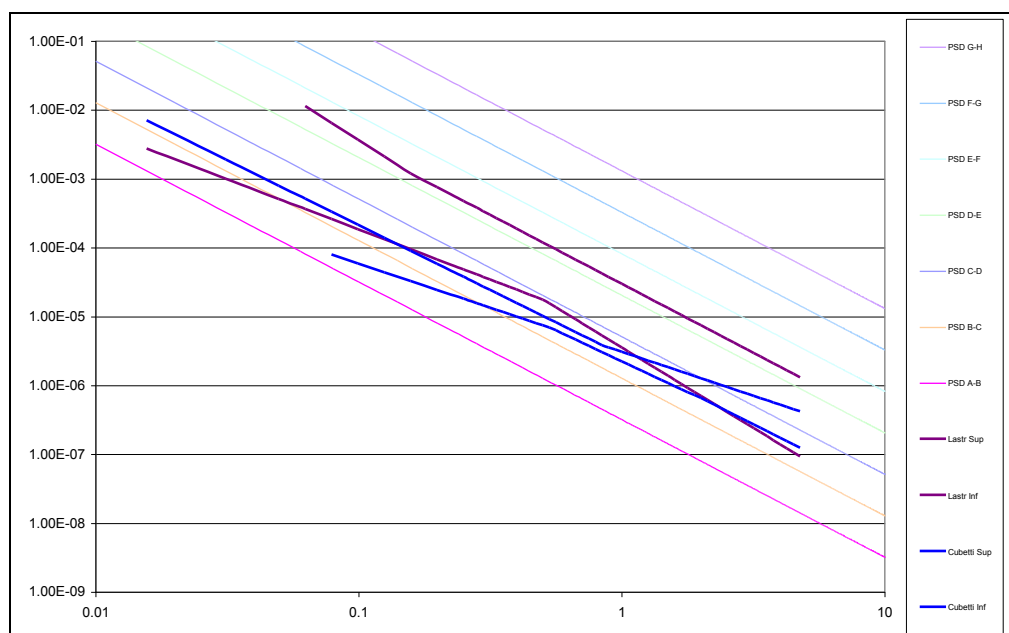




**Fig. 7.21** - Confronto tra gli spettri delle pavimentazioni in lastricato (rosso) ed in cubetti (azzurro).

Si può notare che la pavimentazione in lastricato presenta un contenuto in frequenza maggiore rispetto alla pavimentazione in cubetti, soprattutto nell'intervallo di frequenza in cui è compresa la maggior parte del contenuto spettrale (da 0.1 a 0.3 cicli/m).

Questa considerazione non vale solo per le due pavimentazioni riportate a titolo di esempio, ma può essere generalizzata se prendiamo a riferimento il fuso caratteristico delle pavimentazioni in lastricato ed in cubetti:



**Fig 7.22** – Confronto tra il fuso caratteristico del lastricato e dei cubetti

---

Si può osservare che alle all'inizio (basse frequenze) e alla fine (alte frequenze) i due fusi si intersecano. Mentre però alle basse frequenze c'è solo un intreccio tra l'estremo superiore del fuso delle pavimentazioni in cubetti, con l'estremo inferiore del fuso delle pavimentazioni in lastricato, alle alte frequenze il fuso della pavimentazione in lastricato, pur partendo da più sopra di quella della pavimentazione in cubetti, scende repentinamente fino ad inglobare il fuso dei cubetti (il che avviene dopo una frequenza di 1.1 cicli/m).

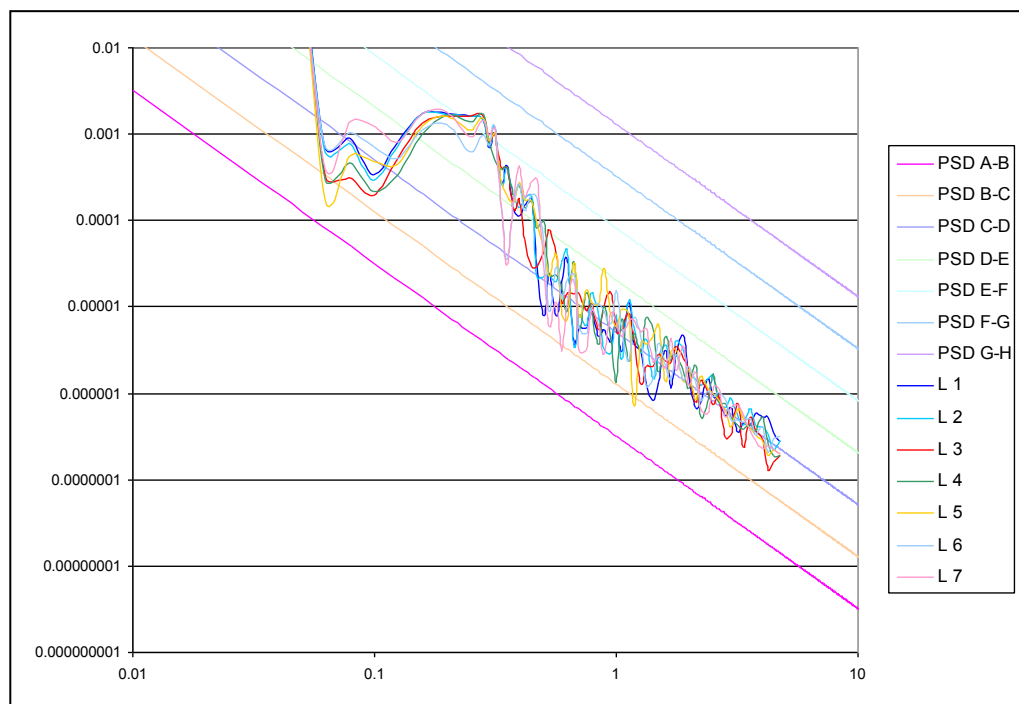
Tuttavia possiamo concludere che, tranne che per frequenze superiori ad 1.1 cicli/m, il fuso caratteristico delle pavimentazioni in lastricato si trova sempre più sopra di quello delle pavimentazioni in cubetti, a riprova del fatto che le pavimentazioni in lastricato sembrerebbero evidenziare una irregolarità maggiore di quelle in cubetti.

## **7.4 VARIABILITA' TRASVERSALE DEI PROFILI LONGITUDINALI**

Come abbiamo avuto modo di spiegare in precedenza, il profilometro laser impiegato nella sperimentazione per il reperimento dei dati è in grado di acquisire contemporaneamente i profili lungo sette allineamenti longitudinali in corrispondenza del posizionamento delle sette teste laser di rilievo. Infatti, nella barra di lettura (lunga 150 cm) sono disposti, a varia distanza dal centro della barra stessa, sette teste laser che di fatto consentono di ottenere, per ogni misura, i profili di questi allineamenti paralleli. Avendo quindi a disposizione sette profili paralleli acquisiti contestualmente sulla stessa pavimentazione, si è voluto verificare che tipo di rispondenza potessero avere tali profili.

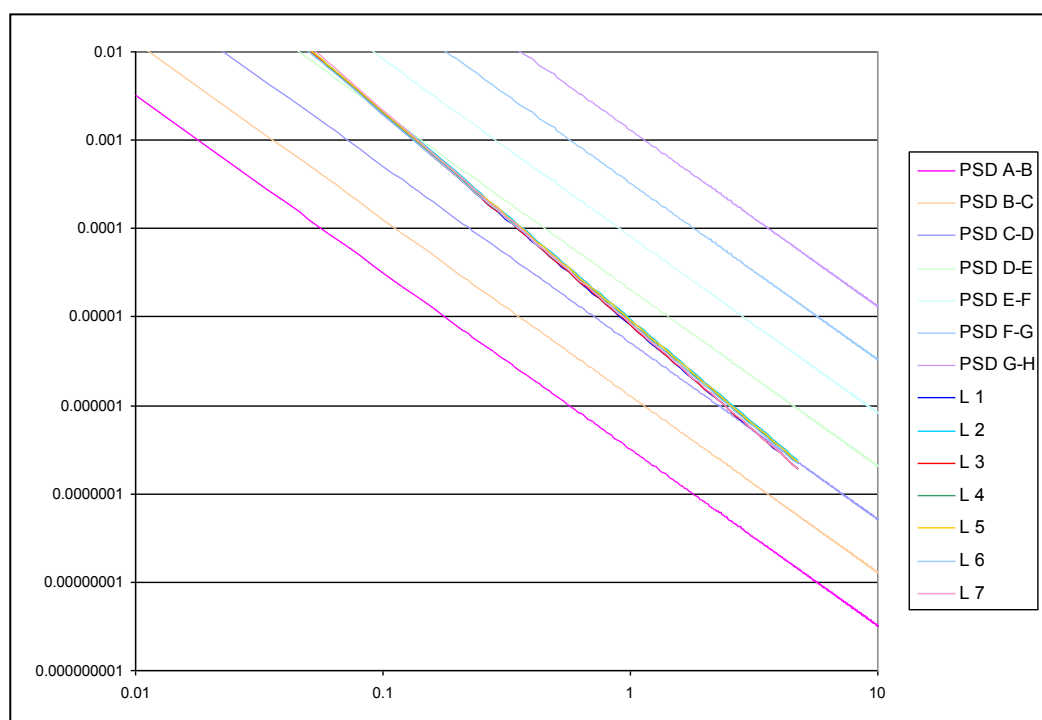
Ci siamo di seguito riferiti ad un tratto di una pavimentazione in lastricato, della lunghezza di circa 50 m, in cui i profili dei sette allineamenti paralleli sono risultati tutti stazionari.

Riportiamo, quindi, i confronti tra le PSD smussate dello spostamento verticale calcolate per i diversi allineamenti longitudinali rilevati dai sette sensori laser:



**7.23** - Confronti tra le PSD smussate dello spostamento verticale calcolate per i diversi allineamenti longitudinali rilevati dai sette sensori laser.

La figura seguente, invece, confronta le regressioni delle PSD smussate dello spostamento verticale calcolate per i diversi allineamenti longitudinali rilevati dai sette sensori laser:



**7.24** - Confronti tra le regressioni delle PSD smussate dello spostamento verticale calcolate per i diversi allineamenti longitudinali rilevati dai sette sensori laser.

Dall'esame delle figure 7.23 e 7.24 possiamo osservare che per pavimentazioni lapidee in lastricato le funzioni di densità spettrale di potenza pur rilevate su allineamenti longitudinali diversi appaiono alquanto vicine fra di loro collocandosi tutte all'interno della stessa classe definita dalla classificazione della norma ISO 8608 (classe E, nell'esempio in figura).

Per pavimentazioni lapidee in lastricato, all'interno di una fascia trasversale di circa 150 cm la variabilità delle caratteristiche di densità spettrale di potenza appare assai contenuta. Tale sostanziale uniformità nelle caratteristiche spettrali del profilo sembra indicare una sostanziale invariabilità trasversale dei profili delle pavimentazioni in lastricato.

## 7.5 GENERAZIONE ARTIFICIALE DI PROFILI DI PAVIMENTAZIONI LAPIDEE

Come già espresso in precedenza, diversi autori hanno mostrato che, una volta nota la funzione PSD degli spostamenti verticali, è possibile generare artificialmente un profilo stradale attraverso la relazione tra contenuto spettrale e la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo stesso.

Infatti, partendo dallo sviluppo dell'espressione:

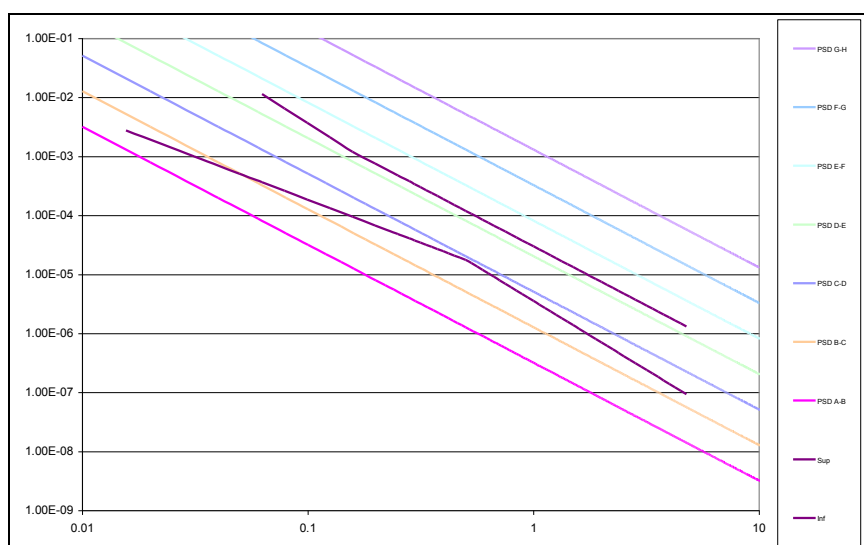
$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i)}{\Delta n} = \frac{A_i^2}{2 \cdot \Delta n}$$

ed assumendo un angolo di fase  $\varphi_i$ , distribuito secondo una variabile aleatoria uniforme nell'intervallo  $[0, 2\pi]$ , il profilo artificiale può essere generato attraverso la seguente espressione:

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} A_i \cos(2\pi \cdot n_i \cdot x + \varphi_i) = \\ &= \sum_{i=0}^{\frac{n_{\max}}{\Delta n}} \sqrt[2]{2 \cdot \Delta n \cdot G_d(i \cdot \Delta n)} \cdot \cos(2\pi \cdot i \cdot \Delta n \cdot x + \varphi_i) \end{aligned}$$

Per poter generare artificialmente un profilo stradale è però indispensabile conoscere la PSD del profilo stesso. Nel caso in cui la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo non fosse disponibile, la nostra proposta è quella di sceglierne arbitrariamente una appartenente al fuso caratteristico del tipo di pavimentazione di cui si voglia generare il profilo.

Per le pavimentazioni in lastricato, infatti, è possibile fornire un fuso in cui sono contenute le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali dei profili di tali sovrastrutture.



7.25 – Fuso caratteristico pavimentazioni in lastricato.

Partendo dal fuso caratteristico della tipologia di pavimentazione, è possibile generare artificialmente il profilo di una pavimentazione in lastricato scegliendo una PSD smoothed rettificata che sia contenuta all'interno del fuso.

A tale profilo andranno però aggiunte una serie di irregolarità puntuali di una certa frequenza (cioè numerosità), profondità ed estensione.

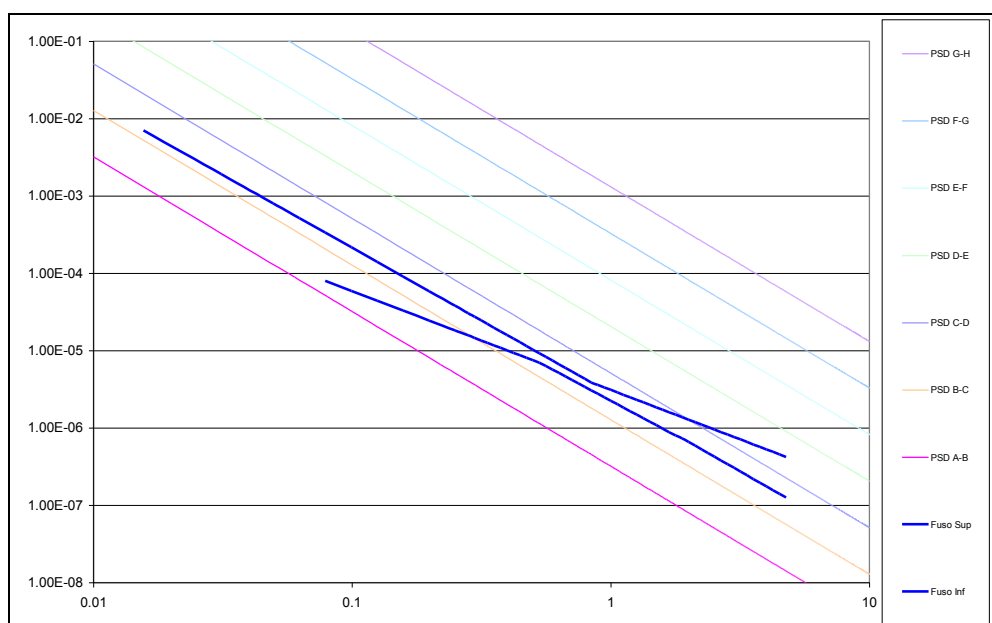
Per determinare le caratteristiche di queste irregolarità fittizie da introdurre nel profilo generato, si è fatto riferimento ai valori medi delle irregolarità reali registrate sulle pavimentazioni in lastricato:

Frequenza media	Estensione media	Profondità media
11 m	17 cm	-0.04 m

**Tabella 2** - Valori caratteristici delle irregolarità puntuali da inserire nella ricostruzione di un profilo in lastricato.

Quindi, per la generazione artificiale di un profilo in lastricato è necessario aggiungere una irregolarità puntuale ogni 11m, con una estensione media di 17 cm e con una profondità media di 4 cm.

Anche per le pavimentazioni in cubetti vale lo stesso ragionamento. Partendo dal fuso caratteristico delle pavimentazioni in cubetti, è possibile generare artificialmente il profilo di una pavimentazione scegliendo una PSD smoothed rettificata che sia contenuta all'interno del fuso.



**7.26** – Fuso caratteristico pavimentazioni in cubetti.

Anche in questo caso, a tale profilo andranno aggiunte una serie di irregolarità puntuali di una certa frequenza , profondità ed estensione; per le pavimentazioni in cubetti però si deve differenziare il discorso nel caso in cui si voglia generare un profilo di una pavimentazione in cubetti in condizioni ottime o meno.

Si è infatti osservato che le pavimentazioni lapidee in cubetti, in funzione dello stato di conservazione delle stesse, tendono a generare un numero di irregolarità puntuali molto variabile. Per pavimentazioni in cubetti di recente realizzazione si può anche non registrare nessuna singolarità. Per pavimentazioni in cubetti in uno stato di conservazione non ottimale, è invece possibile individuare dei valori medi per quanto riguarda la frequenza, l' estensione e la profondità delle irregolarità puntuali:

---

Frequenza media	Estensione media	Profondità media
30 m	10 cm	-0.055 m

**Tabella 3** - Valori caratteristici delle irregolarità puntuali da inserire nella ricostruzione di un profilo in cubetti.

Quindi, per la generazione artificiale di un profilo di una pavimentazione in cubetti in uno stato di conservazione non ottimale, è necessario aggiungere una irregolarità puntuale ogni 30 m, con una estensione media di 10 cm e con una profondità media di 5.5 cm.

Possiamo quindi desumere che nelle pavimentazioni lapidee in cubetti si tende a riscontrare un numero minore di irregolarità puntuali, che hanno anche una estensione minore (paragonabile alla dimensione caratteristica degli elementi lapidei, cioè circa 10 cm) ma che presentano una maggiore profondità media.

Per poter però generalizzare la trattazione circa l'inserimento delle irregolarità puntuali nella generazione artificiale di profili di pavimentazione in cubetti, sono necessari ulteriori approfondimenti.

## 7.6 CONSIDERAZIONI SUL COMFORT DI MARCIA SU PAVIMENTAZIONI LAPIDEE

Come è stato possibile osservare dall'esame degli spettri delle pavimentazioni lapidee in cubetti ed in lastricato (figure 7.12, 7.17 e 7.21), la maggior parte del contenuto spettrale di queste pavimentazioni lapidee si trova nell'intervallo di frequenze [0.1 cicli/m – 0.3 cicli/m].

Ricordando che la lunghezza d'onda rappresenta l'inverso della frequenza, le lunghezze d'onda massime rappresentative di questo intervallo di frequenza saranno quindi:

$$\lambda_{\max 1} = \frac{1}{n_1} = \frac{1}{0.3} = 3m$$

$$\lambda_{\max 2} = \frac{1}{n_2} = \frac{1}{0.1} = 10m$$

---

Facendo riferimento adesso alla nota formula che mette in relazione la velocità, la lunghezza d'onda e la frequenza temporale:

$$V = \lambda f_t$$

possiamo andare a determinare l'intervallo di frequenze temporali massime che corrispondono alle massime lunghezze d'onda presenti per le pavimentazioni lapidee.

Ricordiamo inoltre che, come ampiamente documentato nel capitolo dedicato alle indagini sperimentali, in ambito urbano difficilmente si riescono ad attingere velocità di crociera elevate, nei calcoli abbiamo assunto quindi una velocità operativa in ambito urbano per i veicoli pesanti (che sono quelli maggiormente responsabili dei degradi superficiali) pari a 30 km/h, equivalenti a circa 8.3 m/s.

Otteniamo quindi:

$$8.3 = [3 \div 10] f_t$$

da cui:

$$f_{t1} = 2.77 \text{ Hz}$$

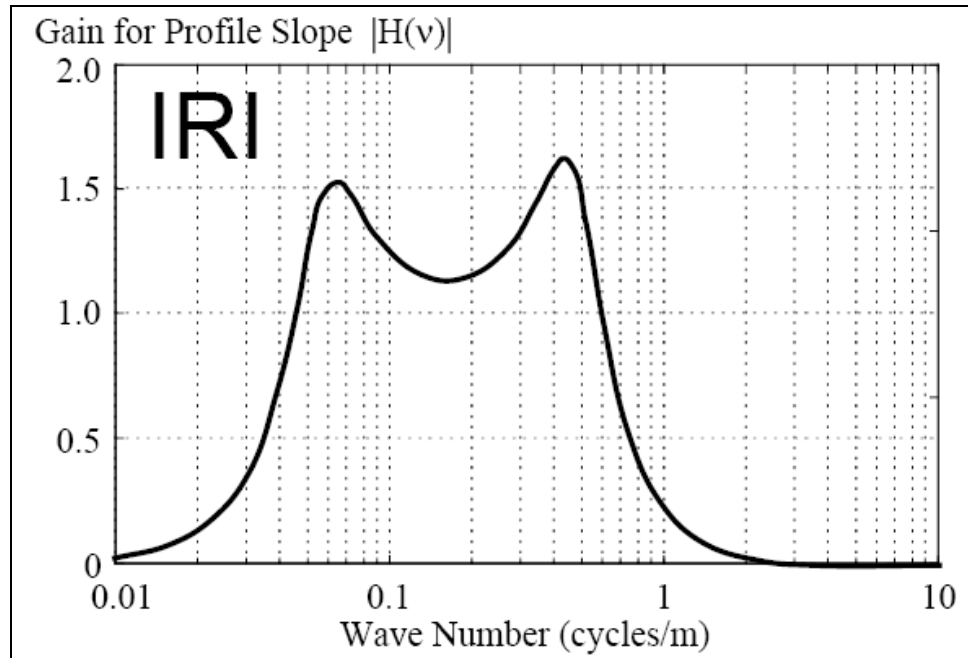
$$f_{t2} = 0.83 \text{ Hz}$$

Quindi, l'intervallo di frequenze temporali massime che corrispondono alle massime lunghezze d'onda presenti per le pavimentazioni lapidee è [0.83Hz - 2.77Hz], la cui media è 1.8 Hz che è compreso nell'intervallo di frequenze spaziali [1Hz – 2Hz], che rappresenta proprio l'intervallo di frequenza di oscillazione della cassa del veicolo.

Quindi, ai fini del comfort l'ondulazione non è data dalla frequenza di oscillazione delle sospensioni (che è una frequenza alta, pari a circa 10-20 Hz), ma dalla frequenza di oscillazione della cassa (che è invece molto lenta, appunto circa 1-2 Hz). Questa frequenza di oscillazione è attivata proprio nel campo di frequenze spaziali in cui è maggiormente racchiuso il contenuto in frequenza delle pavimentazioni lapidee. Possiamo quindi affermare che tali pavimentazioni posseggono intrinsecamente un contenuto in frequenza tale da attivare il moto di oscillazione della cassa, che ha grossa influenza sul comfort di marcia.



D'altro canto, dobbiamo però rilevare che spesso per effettuare valutazioni sul comfort di marcia ci si riferisce alla funzione Gain dell'IRI, della quale si è già parlato nei capitoli precedenti:



7.27 – Funzione Gain dell'IRI.

I picchi della funzione di Gain dell'IRI si individuano intorno alle frequenze di 0.0065 cicli/m e 0.45 cicli/m. Queste frequenze spaziali sono caratteristiche di una lunghezza d'onda di 15m (per il primo picco) e di 2.4m (per il secondo picco).

Ricordando che l'IRI viene convenzionalmente calcolato ad una velocità di 80 km/h, pari a circa 22.22 m/s, utilizzando sempre la relazione  $V = \lambda f_t$ , possiamo determinare le frequenze temporali corrispondenti alle lunghezze d'onda relative ai picchi del diagramma del Gain dell'IRI:

$$22.22 = [2.4 \div 15] f_t$$

da cui:

$$f_{t1} = 9.25 \text{ Hz}$$

$$f_{t2} = 0.73 \text{ Hz}$$

---

Si ritrova quindi un intervallo di frequenze temporali pari a  $[0.73\text{Hz} - 9.25\text{Hz}]$  che però non fornisce alcuna informazione, come era facile aspettarsi. Infatti, come ricordato prima, l'indice IRI è convenzionalmente calcolato ad una velocità operativa di 80 km/h; ma tali velocità sono però difficilmente attingibili in ambito urbano. Per cui, per effettuare valutazioni sul comfort di marcia utilizzando la funzione Gain dell'IRI è necessario modificare tale funzione per adattarla alle velocità più basse che si registrano in ambito urbano, riferendosi così ad una più opportuna funzione di Gain dell'IRI "Urbano".

Si sono quindi ricavate le lunghezze d'onda corrispondenti ai picchi della nuova funzione Gain dell'IRI "Urbano". Il calcolo è stato impostato utilizzando una velocità operativa in ambito urbano sempre pari a 30 km/h:

$$V = \lambda f_i$$

$$8.33 = \lambda[0.73 \div 9.25]$$

da cui

$$\lambda_{picco1} = 0.89m$$

$$\lambda_{picco2} = 11.36m$$

Successivamente, invertendo tali lunghezze d'onda massime si sono potute determinare le frequenze spaziali in corrispondenza delle quali si registrano i picchi della nuova funzione Gain dell'IRI "Urbano":

$$f_{spaziale1} = 1.12\text{cicli} / m$$

$$f_{spaziale2} = 0.09\text{cicli} / m$$

---

Si è così pervenuti ad un intervallo di frequenze di [0.09 cicli/m – 1.12 cicli/m] in corrispondenza delle quali si individuano i due picchi della nuova funzione di Gain dell'IRI "Urbano", ed all'interno del quale la funzione stessa assume valori considerevoli.

Questo intervallo di frequenze spaziali è molto significativo; infatti in esso è contenuto praticamente tutto lo spettro delle pavimentazioni lapidee (in particolare, per esse la maggior parte del contenuto in frequenza è racchiuso nell'intervallo [0.1-0.3] cicli/m).

Ciò implica che, considerando anche le più basse velocità attinte in ambito urbano, la maggior parte del contenuto in frequenza delle pavimentazioni lapidee è compreso tra i due picchi della funzione Gain dell'IRI "Urbano" per cui, come era facile attendersi, queste tipologie di pavimentazioni hanno grossa ricaduta sul comfort di marcia.

Il contenuto in frequenza delle pavimentazioni lapidee si trova tutto oltre il primo picco della funzione di Gain dell'IRI "Urbano", ed in particolare l'estremo inferiore dell'intervallo di frequenze in cui è racchiuso la maggior parte del contenuto spettrale delle pavimentazioni lapidee quasi coincide con il valore di frequenza corrispondente al primo picco della funzione di Gain dell'IRI "Urbano". Quindi, se si utilizza la funzione di Gain dell'IRI "Urbano" per effettuare considerazioni sul comfort di marcia in ambito urbano, appare evidente come la natura delle pavimentazioni lapidee abbia grossa influenza sullo stesso.

Utilizzare il modello proposto di sezionamento dei profili in sotto tratte stazionarie esposto nel corso del capitolo 6, fornisce la possibilità di individuare tratte in cui il comfort di marcia possa ritenersi maggiore e tratte in cui è minore.

## **7.7 PROPOSTA DI UNA METODOLOGIA A BASSO COSTO PER LA RAPPRESENTAZIONE DELLA REGOLARITA'**

Generalizzando quanto riportato nella equazione sottostante, può affermarsi che l'area sottesa dalla funzione di Densità Spettrale di Potenza dello Spostamento Verticale tra due valori arbitrari di frequenze spaziali,  $n_1$  ed  $n_2$  rappresenta la varianza del processo per quella assegnata banda di indagine e pertanto la radice quadrata del valore di tale area costituisce il valore quadratico medio (*Root Mean Square, RMS*) ovvero la deviazione standard se il processo è a media nulla.

---


$$G_d(n_i) = \frac{\Psi_x^2(n_i, \Delta n)}{\Delta n} = \frac{\Psi_x^2(i \cdot \Delta n, \Delta n)}{\Delta n}$$

Se la PSD è rappresentata da una regressione lineare nel riferimento bi-logaritmico, la varianza associata ad un determinato intervallo di variazione delle frequenze spaziali può essere calcolata attraverso l'espressione:

$$Var(n_1, n_2) = \int_{n_1}^{n_2} e^a n^b dn$$

e quindi:

$$Var(n_1, n_2) = e^a \left( \frac{n_2^{b+1}}{b+1} - \frac{n_1^{b+1}}{b+1} \right)$$

Si consideri ora una barra profilometrica di lunghezza  $L$  divisa in  $m$  segmenti uguali ciascuno di lunghezza pari a  $B$ . Se si effettua un rilievo della superficie stradale con tale barra secondo un intervallo di campionamento pari a  $B$  e quindi in corrispondenza di  $m+1$  punti, si intende, con tale operazione, caratterizzare statisticamente la banda del processo aleatorio che descrive l'irregolarità stradale compresa tra un valore minimo di frequenza spaziale pari a  $n_0 = 1/(2L)$  ed un valore massimo  $n_1 = 1/(2B)$ , in virtù del ben noto teorema di Nyquist.

Il quadrato della deviazione standard che caratterizzerà l'insieme delle elevazioni del profilo così campionate rappresenterà, per quanto detto, l'area sottesa dalla PSD per l'intervallo di variazione delle frequenze spaziali  $[n_0, n_1]$ .

Se si ripete l'operazione di rilievo con la stessa barra ma utilizzando un intervallo di campionamento pari a  $B/2$  e quindi in corrispondenza di  $2m+1$  punti equispaziati, si ottengono informazioni statistiche utili a caratterizzare la banda del processo aleatorio che descrive l'irregolarità stradale compresa tra un valore minimo di frequenza spaziale pari a  $n_0 = 1/(2L)$  ed un valore massimo  $n_2 = 1/(B)$ .

Similmente a quanto osservato in precedenza, anche in questo caso, il quadrato della deviazione standard che caratterizzerà l'insieme delle elevazioni del profilo così campionate rappresenterà l'area sottesa dalla PSD per l'intervallo di variazione delle frequenze spaziali  $[n_0, n_2]$ , dove in tal caso,  $n_2 > n_1$ .

---

Se ne deduce che se si decide di descrivere una PSD attraverso la sua retta di regressione nel riferimento bi-logaritmico le due operazioni di rilievo permettono di restituire delle stime della varianza rispetto a due diversi intervalli di variazione delle frequenze spaziali. Può quindi scriversi:

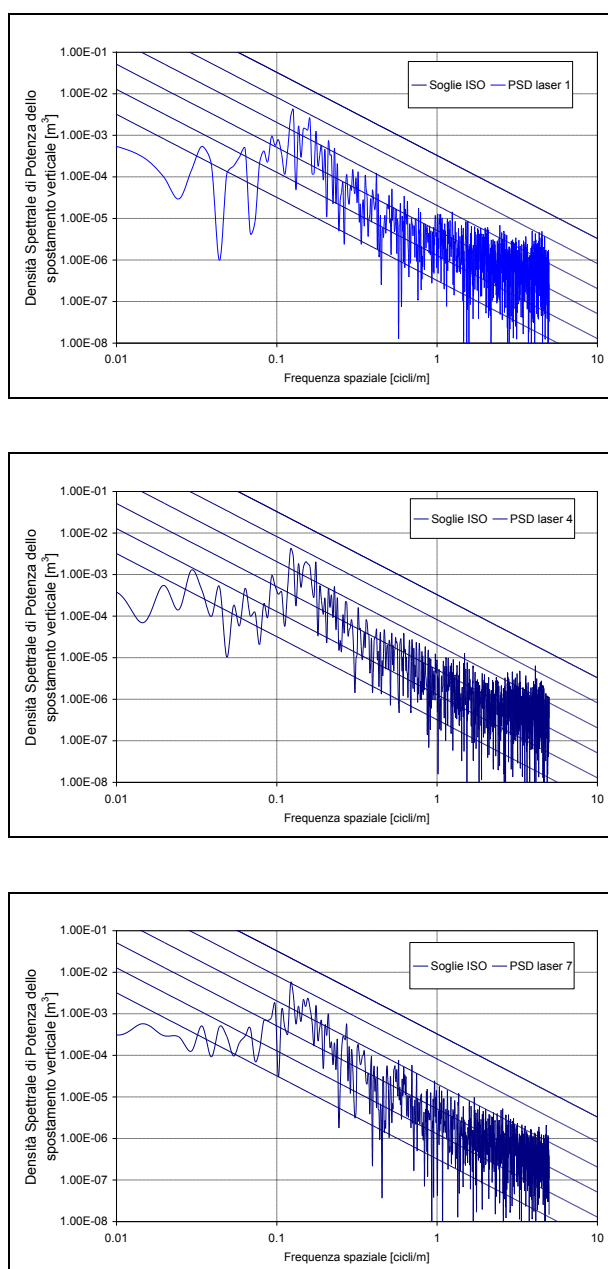
$$\begin{cases} Var(n_0, n_1) = e^a \left( \frac{n_1^{b+1}}{b+1} - \frac{n_0^{b+1}}{b+1} \right) \\ Var(n_0, n_2) = e^a \left( \frac{n_2^{b+1}}{b+1} - \frac{n_0^{b+1}}{b+1} \right) \end{cases}$$

che come si evince banalmente, costituisce un sistema di tipo non lineare in due equazioni nelle due incognite  $a$  e  $b$  che rappresentano i parametri della retta di regressione ricavata dalla PSD smussata.

Mediante l'ausilio di una barra profilometrica operando due serie di rilievi secondo due diversi intervalli di campionamento, risulta quindi possibile pervenire ad una stima del modello regressivo derivato dall'operazione di *smoothing* della PSD.

In base a tali considerazioni, a valle di misure di profilo effettuate su pavimentazioni lapidee si è verificato, mediante un approccio di tipo simulativo, se l'impiego di una barra profilometrica di lunghezza pari a 4 metri e con un passo di campionamento rispettivamente di 0.25 e 0.50 metri, permettesse di pervenire ad una stima della retta di regressione della PSD smussata che fosse affetta da una adeguata precisione.

Come si è detto, un unico passaggio dell'apparecchiatura profilometrica restituisce le misure del profilo stradale secondo 7 allineamenti longitudinali. Tali profili rilevati sono stati sottoposti a procedure di filtraggio al fine di depurare le informazioni non rilevanti e sono stati ricavati i relativi Spettri di Densità di Potenza dello Spostamento Verticale. Nelle figure successive vengono riportati le PSD dello spostamento verticale per 3 dei 7 laser per una stessa misurazione del profilo, rispetto alle soglie di irregolarità proposte dall'ISO.

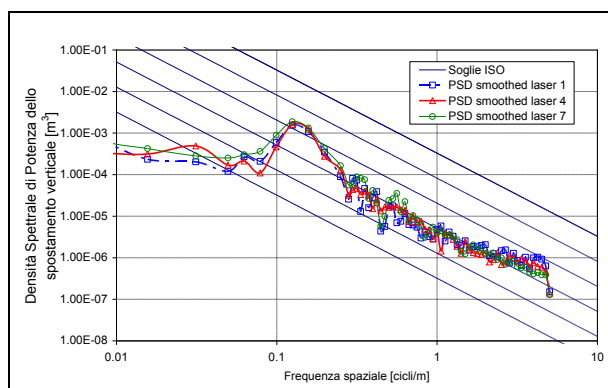


**Fig. 7.28** - PSD dello spostamento verticale dei profili rilevati lungo i laser 1,4 e 7 di un'unica misurazione effettuata su una pavimentazione lapidea a cubetti

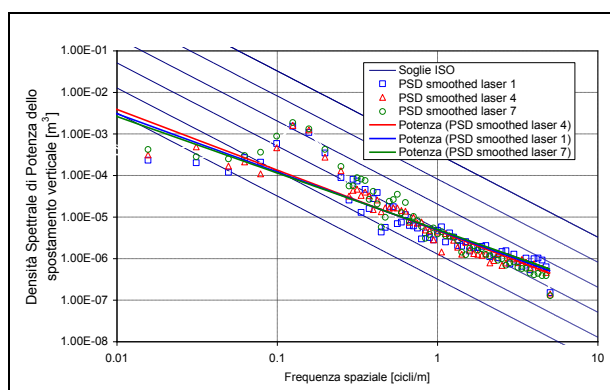
Come si evince dall'esame delle figure le funzioni di densità spettrale di potenza pur rilevate su allineamenti longitudinali diversi appaiono alquanto vicine fra di loro collocandosi tutte tra la classe C e quella D definite secondo la norma ISO.

Un ulteriore conferma della sostanziale similarità tra le PSD dello spostamento verticale si può ricavare dall'esame delle funzioni di densità spettrale di potenza "smussate", secondo la procedura proposta dall'ISO, degli stessi allineamenti precedentemente

analizzati riportate nella figura successiva, così come dal confronto delle rispettive regressioni :



**Fig. 7.29** - Confronto tra le PSD dello Spostamento Verticale “smussate” per i diversi allineamenti longitudinali rilevati (sensori 1, 4 e 7).



**Fig. 7.30** - Confronto tra le regressioni effettuate sulle PSD dello Spostamento Verticale “smussate” per i diversi allineamenti longitudinali rilevati (sensori 1, 4 e 7).

Successivamente, si è preso in esame il profilo rilevato in corrispondenza di un solo allineamento di lunghezza pari a circa 40 m su cui è stato simulato l’impiego di un barra profilometrica “poggiata” sulla superficie stradale. Come specificato in precedenza, è stata ipotizzata una lunghezza complessiva della barra di 4 metri. La procedura prevede l’esecuzione di un primo rilievo (simulato), misurando le distanza tra la superficie stradale e la barra secondo un intervallo di campionamento pari a 0.50 m ottenendo complessivamente 9 valori della elevazione del profilo e successivamente un secondo rilievo con un intervallo di campionamento di 0.25 m in base al quale sono stati ricavati 17 valori della elevazione del profilo.

Si è inteso pertanto stimare, le caratteristiche statistiche del processo aleatorio che descrive l’irregolarità stradale per un banda che si estende dalla frequenza spaziale  $n_0$  di valore pari a 0.125 cicli/m ad una frequenza spaziale  $n_1$  di valore pari a 1 ciclo/m, per il

---

primo rilievo, mentre, per il secondo rilievo, fino ad una frequenza spaziale  $n_2$  di valore pari a 2 cicli/m.

Nella fattispecie, la procedura di simulazione dei rilievi effettuati con la barra profilometrica si è articolata secondo i seguenti passi:

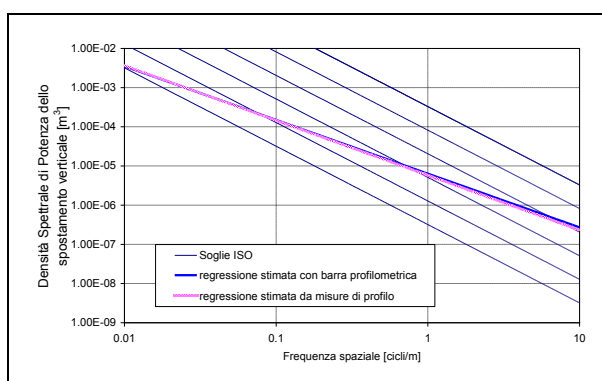
1. sono stati estratti casualmente 21 punti sul profilo rilevato in corrispondenza dei quali posizionare la barra;
2. partendo da ognuno di questi punti sono stati simulati due rilievi del profilo mediante la barra profilometrica con un passo di campionamento di 0.50 e 0.25 m ottenendo 2 serie di misure costituite rispettivamente da 9 e da 17 valori di elevazione;
3. da ogni serie di misura sono stati eliminati i due valori maggiori; con tale operazione si è inteso “depurare” il profilo dagli effetti indotti dalla presenza di eventuali irregolarità singolari (buche, avvallamenti e/o depressioni in prossimità dei chiusini) che sono assai frequenti soprattutto nelle pavimentazioni lapidee e che possono pregiudicare i requisiti di stazionarietà del processo su cui si fonda la procedura stessa;
4. da ogni serie così depurata è stata calcolata la deviazione standard;
5. è stato calcolato il valore medio delle deviazioni standard per ognuno delle rilievi campionati a 0.5 m nelle 21 posizioni estratte casualmente;
6. analogamente a quanto fatto in precedenza, è stato calcolato il valore medio delle deviazioni standard per ognuno delle rilievi campionati a 0.25 m nelle 21 posizioni estratte casualmente;
7. dai valori medi così calcolati sono state successivamente ricavate le rispettive varianze;
8. note le varianze si è proceduto ad una stima dei parametri di regressione  $a$  e  $b$  del modello regressivo della PSD smussata, risolvendo il sistema non lineare riportato in precedenza.

I risultati di tali elaborazioni sono riportati nella tabella successiva ed in forma grafica nella figura seguente :



Parametri della regressione	<i>a</i>	<i>b</i>
Stima effettuata attraverso la simulazione con barra profilometrica	<b>-11.9654</b>	<b>-1.371</b>
Stima ricavata dalla PSD del profilo ottenuta mediante misure ad alto rendimento	<b>-12.0573</b>	<b>-1.3992</b>

**Tabella 4** - Confronto tra i valori stimati attraverso l'impiego della barra profilometrica e quelli derivati dalla PSD del profilo rilevato dall'apparecchiatura ad alto rendimento.

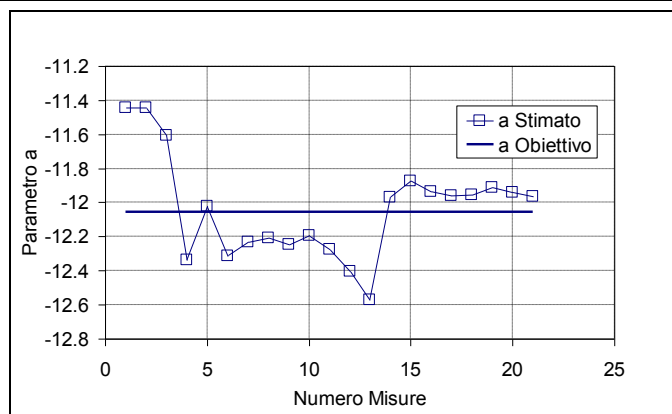


**Fig. 7.31** - Confronto tra la stima del modello regressivo fornita dalla barra profilometrica e quella ricavata dalla PSD dello Spostamento Verticale derivata dalla misura di profilo effettuata con profilometro laser.

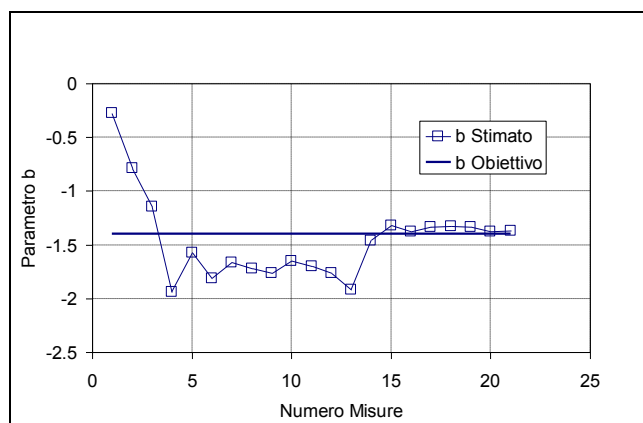
Come si evince anche dall'esame visivo della figura precedente, la stima della retta di regressione operata attraverso l'impiego di una barra profilometrica appare in buon accordo con quella ricavata dalla PSD dello spostamento verticale derivata dalle misure di profilo.

Un aspetto rilevante della procedura proposta è rappresentato dall'influenza del numero di misure sulla bontà della stima.

Raffigurando l'andamento della stima dei parametri *a* e *b* della regressione in funzione della numerosità delle misure, riportati convenientemente nelle figure successive, si può notare come siano necessarie almeno 15 ripetizioni per ottenere una stima dei suddetti parametri che sia caratterizzata da una adeguata precisione.



**Fig. 7.32** - Andamento della stima del parametro  $a$  della regressione sulla PSD smussata operata mediante le simulazioni effettuate con la barra profilometrica in funzione della numerosità delle misure.



**Fig. 7.33** - Andamento della stima del parametro  $b$  della regressione sulla PSD smussata operata mediante le simulazioni effettuate con la barra profilometrica in funzione della numerosità delle misure.

In relazione alla metodologia di misura proposta, le analisi effettuate sembrano evidenziare che l'algoritmo sviluppato riesce a stimare con un accettabile livello di precisione i parametri della curva di regressione ricavata dalla funzione di densità spettrale di potenza dello spostamento verticale “smussata” secondo la procedura proposta dalla norma ISO 8608.

Appare inoltre evidente, in prospettiva, che la stima della PSD “rettificata” attraverso semplici misure effettuate con l'ausilio di una barra profilometrica (anche per la possibilità che questa offre di poter calcolare altri indici descrittivi di tipo sintetico come l'IRI), può rappresentare un utile strumento per semplificare valutazioni complesse sulle analisi dei profili stradali.

---

## CONCLUSIONI

- Il lavoro ha inteso fornire un contributo nell'analisi dei profili di pavimentazioni stradali urbane. Lo studio si è sviluppato a valle di una estesa campagna sperimentale di misure delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni condotta sulla viabilità principale della città di Napoli.
- Si è fornito un protocollo di prova che permette l'impiego in ambito urbano di apparecchiature ad alto rendimento per l'acquisizione dei profili stradali. In particolare si è fatto riferimento ad una procedura che permette la corretta esecuzione delle prove ed immagazzinamento dei dati e ad una metodologia di trattazione preliminare dei dati acquisiti.
- Ulteriori considerazioni hanno riguardato le modalità operative di misura che sembrano differenziarsi da quelle convenzionalmente adottate in ambito extra-urbano sia in ordine alle tecniche di sezionamento che al calcolo di indicatori descrittivi di tipo sintetico che necessitano di un opportuno ripensamento per poter essere adeguati alle differenti esigenze ed ai vincoli imposti dalla viabilità urbana.
- L'analisi delle misure di regolarità condotta su un campione di pavimentazioni lapidee in lastricato ed in cubetti ha permesso di individuare e calibrare una originale procedura di rielaborazione volta a razionalizzare l'acquisizione e la successiva archiviazione dei dati di profilo. La procedura messa a punto, consente di individuare ed estrarre le cosiddette irregolarità concentrate e di ricondurre successivamente il profilo ad una successione di tratte stazionarie. L'applicazione di tale algoritmo ai profili acquisiti ha inoltre evidenziato che esiste una forte variabilità delle caratteristiche spettrali e statistiche all'interno dei profili. Trascurare tale aspetto può condurre ad un'impresione nella valutazione degli Indicatori di Prestazione, che può avere riflessi nella programmazione degli interventi manutentivi o nello sviluppo di modelli di deterioramento dei parametri di stato.

- 
- Si è proposta una possibile procedura con la quale si è cercato di stimare, in qualche misura, la porzione di profilo persa a causa dell'interruzione del segnale che si registra in fase di acquisizione di dati di profilo su pavimentazioni particolarmente ammalorate, per le quali si manifesta un problema di “fuori scala” dello strumento di misura. Applicando la procedura proposta per la caratterizzazione dei profili a segnali così ricostruiti, il numero di tratte stazionarie individuate è maggiore rispetto al caso dei profili non tagliati, ma è possibile riscontrare una certa congruenza tra i punti di frontiera, cioè si incontra una similitudine tra le ascisse dei punti di passaggio tra una classe ed un'altra, che ci fanno comunque credere che una percentuale di lunghezza da ricostruire pari al 10% possa essere tollerata. Tuttavia non è preferibile andare oltre una percentuale di segnale perso superiore al 5%, per il quale si è osservato che il numero di irregolarità fornite è molto prossimo a quelle rilasciate per il profilo di partenza e, soprattutto, sono sostanzialmente localizzate negli stessi punti. Procedendo con l'implementazione del modello proposto a questo profilo si perviene a risultati del tutto simili a quelli ottenuti per il profilo reale di partenza.
  - Si è fornita una proposta di modifica all'algoritmo di calcolo della PSD smussata della Norma ISO 8608
    - 1 Per le pavimentazioni in cubetti la differenza percentuale del parametro  $a$  della retta di regressione della PSD smussata calcolata con la correzione alla formula fornita dalla Norma ISO 8608 rispetto allo stesso parametro calcolato per la regressione della PSD smussata da ISO, è pari a circa il 10%. Questa differenza in percentuale sale al 20% se la andiamo a valutare per le sole tratte di lunghezza minore di 20m. Per il parametro  $b$ , invece, la differenza percentuale è pari a circa lo 0.7% se calcolato su tutti i profili, e sale al 2.3% se lo si valuta per le sole tratte di lunghezza minore di 20m.
    - 2 Per le pavimentazioni in lastricato la differenza percentuale del parametro  $a$  della retta di regressione della PSD smussata calcolata con la correzione alla formula fornita dalla Norma ISO 8608 rispetto allo stesso parametro calcolato per la regressione della PSD smussata da ISO, è pari a circa il 12%. Questa differenza in percentuale sale al 15% se la andiamo a valutare

---

per le sole tratte di lunghezza minore di 20m. Per il parametro  $b$ , invece, la differenza percentuale è pari a circa lo 1.6% se calcolato su tutti i profili, e sale al 2.6% se lo si valuta per le sole tratte di lunghezza minore di 20m.

- Per le pavimentazioni in lastricato è stato possibile individuare un fuso rappresentativo della regolarità di tali pavimentazioni, ottenuto componendo le più estreme tra le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie in cui è possibile sezionare i profili investigati. La regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali ottenuta per i profili originari non suddivisi in sotto tratte stazionarie, risulta sempre interamente interna a tale fuso. Viceversa, è quindi possibile affermare che se la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali di un profilo è interna a questo fuso, la pavimentazione in questione è in lastricato.
- Confrontando gli spettri di diversi profili di pavimentazioni in lastricato si può osservare come il contenuto spettrale risulta essere simile tra profili differenti. Per quanto queste pavimentazioni sviluppino elevati livelli di irregolarità, questo lascia presupporre variazioni contenute delle caratteristiche spettrali e delle statistiche dei profili di questo tipo di pavimentazioni. Inoltre si può osservare che la maggior parte del contenuto in frequenza è compreso in una banda tra 0.3 cicli/m e 0.1 cicli/m, che sono frequenze spaziali in corrispondenza delle quali si attiva il moto di oscillazione della cassa dei veicoli pesanti.
- Ai fini della manutenzione stradale, scomponendo il profilo investigato in sotto tratte stazionarie si possono individuare all'interno del profilo quali sono le tratte veramente problematiche ai fini della regolarità. Potrei così programmare degli interventi manutentivi mirati a quelle tratte (di lunghezza anche di pochi metri) particolarmente ammalorate, e migliorare le condizioni globali della pavimentazione almeno in termini di vibrazioni indotte.
- Anche per le pavimentazioni in cubetti è stato possibile individuare un fuso rappresentativo della regolarità di tali pavimentazioni, ottenuto componendo le più estreme tra le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali delle tratte stazionarie in cui è possibile sezionare i profili investigati. La regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali ottenuta per i profili

---

originari non suddivisi in sotto tratte stazionarie, risulta sempre interamente interna a tale fuso. Viceversa, è quindi possibile affermare che se la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali di un profilo è interna a questo fuso, la pavimentazione in questione è lapidea in cubetti.

- Se per le pavimentazioni in cubetti andiamo però a confrontare la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali calcolata per il profilo “tal quale” con il rispettivo fuso di riferimento ottenuto come composizione delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali per le sotto tratte stazionarie estratte dallo stesso profilo, si osserva che la PSD del profilo “tal quale” non stazionario parte sempre dall’interno del fuso ma poi o resta sempre interno ad esso o esce fuori dallo stesso. Ciò vuol dire che alle basse frequenze la regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo “tal quale”, rappresenta bene la regolarità della pavimentazione, ma alle alte frequenze (oltre 1 ciclo/m, frequenza in corrispondenza della quale si verifica la fuori uscita) con la regressione della PSD smussata del profilo “tal quale” tendiamo a sottostimare la regolarità della pavimentazione. La regressione della PSD smussata del profilo “tal quale” esce fuori dal fuso (o resta tangente ad esso) solo nei casi in cui il modello per la localizzazione delle irregolarità puntuali non individua nessuna singolarità. Ciò perché la presenza (o l’assenza) di irregolarità puntuali modifica la pendenza della regressione della PSD smoothed. Quindi, se la regressione della PSD smussata “tal quale” resta interamente dentro al fuso, è proprio perché il contributo dato dalle irregolarità fa pesare di più le basse frequenze rispetto alle alte e quindi la pendenza della regressione della PSD è maggiore e tale segmento tenderà a restare all’interno del fuso.
- Per le pavimentazioni in cubetti in cui si registra che la regressione troncata della PSD smussata degli spostamenti verticali calcolata per il profilo “tal quale” esce fuori dal rispettivo fuso di riferimento ottenuto come composizione delle regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali per le sotto tratte stazionarie estratte dallo stesso profilo; possiamo affermare che ciò accade solo se il modello per la localizzazione delle irregolarità puntuali non individua nessuna singolarità, quindi la regressione della PSD “tal quale” sovrastima il contenuto in frequenza effettivo alle alte frequenze, cioè oltre 1 ciclo/m, ovvero

---

10 Hz, che è proprio la frequenza di oscillazione delle sospensioni. Quindi questa sovrastima ha sicuramente influenza se si vogliono condurre indagini nel campo della generazione di sovraccarichi dinamici che inducono vibrazioni all'interno dell'abitacolo del veicolo o che vengono poi trasmesse ai ricettori esterni. Quindi, per i ragionamenti riguardanti il fenomeno delle vibrazioni, il fatto di tener conto della regressione della PSD smussata degli spostamenti verticali del profilo "tal quale" rispetto a quelle delle sotto tratte stazionarie in cui è possibile sezionare il profilo, mi fa perdere la possibilità di individuare le tratte in cui si registrano maggiori generazioni di vibrazioni e le tratte in cui se ne riscontrano di meno.

- Confrontando gli spettri di diversi profili di pavimentazioni in cubetti si può osservare come anche per esse il contenuto spettrale risulta essere simile tra profili differenti. Anche questa tipologia di pavimentazioni, per quanto sviluppi elevati livelli di irregolarità, lascia presupporre variazioni contenute delle caratteristiche spettrali e delle statistiche di profili diversi. Inoltre si può osservare che la maggior parte del contenuto in frequenza è compreso tra 0.3 cicli/m e 0.1 cicli/m, che sono frequenze spaziali in corrispondenza delle quali si attiva il moto di oscillazione della cassa dei veicoli pesanti.
- Per le pavimentazioni in lastricato, si può osservare che la maggior parte dei segmenti, rappresentativi delle regressioni delle PSD smussate delle sottotratte stazionarie, si distribuiscono tra le classi C e D della classificazione ISO 8608. Per le pavimentazioni in cubetti, invece, le regressioni delle PSD smussate degli spostamenti verticali sono contenute maggiormente tra le classi B e C della classificazione ISO. La pavimentazione in lastricato tende ad avere una irregolarità maggiore della pavimentazione in cubetti, perché le regressioni della PSD degli spostamenti verticali del lastricato, nel grafico di classificazione dell'irregolarità della ISO 8608 si dispongono più sopra di quelle dei cubetti. Questa indicazione è confermata anche dal confronto degli spettri delle pavimentazioni in lastricato ed in cubetti: la pavimentazione in lastricato presenta un contenuto in frequenza maggiore rispetto alla pavimentazione in cubetti, soprattutto nell'intervallo di frequenza in cui è compresa la maggior parte del contenuto spettrale (da 0.1 a 0.3 cicli/m). Questa considerazione può essere generalizzata se prendiamo a riferimento il fuso caratteristico delle

---

pavimentazioni in lastricato e quello delle pavimentazioni in cubetti, tranne che per frequenze superiori ad 1.1 cicli/m il fuso caratteristico delle pavimentazioni in lastricato si trova sempre più sopra di quello delle pavimentazioni in cubetti, a riprova del fatto che le pavimentazioni in lastricato sembrerebbero evidenziare una irregolarità maggiore di quelle in cubetti.

- Per quanto concerne la variabilità trasversale dei profili longitudinali possiamo concludere che per pavimentazioni lapidee in lastricato le funzioni di densità spettrale di potenza, pur rilevate su allineamenti longitudinali diversi e paralleli, appaiono alquanto vicine fra di loro collocandosi tutte all'interno della stessa classe definita dalla classificazione della norma ISO 8608. Per pavimentazioni lapidee in lastricato, all'interno di una fascia trasversale di circa 150 cm la variabilità delle caratteristiche di densità spettrale di potenza appare assai contenuta. Tale sostanziale uniformità nelle caratteristiche spettrali del profilo sembra indicare una sostanziale invariabilità trasversale dei profili delle pavimentazioni in lastricato.
- Per quanto riguarda la generazione artificiale di profili stradali di pavimentazioni lapidee, possiamo dire che partendo dal fuso caratteristico della tipologia di pavimentazione, è possibile generare artificialmente il profilo di una pavimentazione scegliendo una PSD smoothed rettificata che sia contenuta all'interno del fuso. A tale profilo andranno però aggiunte una serie di irregolarità puntuali di una certa frequenza, profondità ed estensione. Per quanto concerne la generazione artificiale di un profilo in lastricato è necessario aggiungere una irregolarità puntuale ogni 11m, con una estensione media di 17 cm e con una profondità media di 4 cm. Per le pavimentazioni in cubetti invece si deve differenziare il discorso nel caso in cui si voglia generare un profilo di una pavimentazione in cubetti in condizioni ottime o meno. Si è infatti osservato che le pavimentazioni lapidee in cubetti, in funzione dello stato di conservazione delle stesse, tendono a generare un numero di irregolarità puntuali molto variabile. Per pavimentazioni in cubetti di recente realizzazione si può anche non registrare nessuna singolarità. Per la generazione artificiale di un profilo di una pavimentazione in cubetti in uno stato di conservazione non ottimale, è invece necessario aggiungere una irregolarità puntuale ogni 30 m, con una estensione media di 10 cm e con una profondità media di 5.5 cm. Possiamo quindi



---

concludere che nelle pavimentazioni lapidee in cubetti si tende a riscontrare un numero minore di irregolarità puntuali, che hanno anche una estensione minore (paragonabile alla dimensione caratteristica degli elementi lapidei, cioè circa 10 cm) ma che presentano una maggiore profondità media.

- Per quanto concerne considerazioni inerenti al comfort di marcia, possiamo osservare che l'intervallo di frequenze temporali massime che corrispondono alle massime lunghezze d'onda presenti per le pavimentazioni lapidee è [0.83Hz - 2.77Hz], la cui media è 1.8 Hz che è compreso nell'intervallo di frequenze spaziali [1Hz - 2Hz] che rappresenta l'intervallo di frequenza di oscillazione della cassa del veicolo. Quindi, ai fini del comfort l'ondulazione non è data dalla frequenza di oscillazione delle sospensioni (che è una frequenza alta, pari a circa 10-20 Hz), ma dalla frequenza di oscillazione della cassa, che è invece molto lenta. Questa frequenza di oscillazione è attivata proprio nel campo di frequenze spaziali in cui è maggiormente racchiuso il contenuto in frequenza delle pavimentazioni lapidee. Possiamo perciò concludere che tali pavimentazioni posseggono intrinsecamente un contenuto in frequenza tale da attivare il moto di oscillazione della cassa, che ha grossa influenza sul comfort di marcia.
- Se si vogliono condurre valutazioni sul comfort di marcia riferendosi alla funzione Gain dell'IRI, bisogna rilevare che l'indice IRI è convenzionalmente calcolato ad una velocità operativa di 80 km/h; ma tali velocità sono però difficilmente attingibili in ambito urbano. Per cui, per effettuare valutazioni sul comfort di marcia utilizzando la funzione Gain dell'IRI è necessario modificare tale funzione per adattarla alle velocità più basse che si registrano in ambito urbano, riferendosi così ad una più opportuna funzione di Gain dell'IRI "Urbano". Si sono quindi ricavate le frequenze spaziali in corrispondenza delle quali si registrano i picchi della nuova funzione Gain dell'IRI "Urbano" per una velocità operativa di 30 km/h. Si è così pervenuti ad un intervallo di frequenze di [0.09 cicli/m - 1.12 cicli/m] in corrispondenza delle quali si individuano i due picchi della nuova funzione di Gain dell'IRI "Urbano", ed all'interno del quale la funzione stessa assume valori considerevoli. Questo intervallo di frequenze spaziali è molto significativo; infatti in esso è contenuto praticamente tutto lo spettro delle pavimentazioni lapidee (in particolare, per esse la maggior parte del contenuto in frequenza è racchiuso nell'intervallo [0.1-0.3] cicli/m). Ciò implica

---

che, considerando anche le più basse velocità attinte in ambito urbano, la maggior parte del contenuto in frequenza delle pavimentazioni lapidee è compreso tra i due picchi della funzione Gain dell'IRI "Urbano" per cui, come era facile attendersi, queste tipologie di pavimentazioni hanno grossa ricaduta sul comfort di marcia. Il contenuto in frequenza delle pavimentazioni lapidee si trova tutto oltre il primo picco della funzione di Gain dell'IRI "Urbano", ed in particolare l'estremo inferiore dell'intervallo di frequenze in cui è racchiuso la maggior parte del contenuto spettrale delle pavimentazioni lapidee quasi coincide con il valore di frequenza corrispondente al primo picco della funzione di Gain dell'IRI "Urbano". Quindi, se si utilizza la funzione di Gain dell'IRI "Urbano" per effettuare considerazioni sul comfort di marcia in ambito urbano, appare evidente come la natura delle pavimentazioni lapidee abbia grossa influenza sullo stesso. Utilizzare il modello proposto di sezionamento dei profili in sotto tratte stazionarie fornisce la possibilità di individuare tratte in cui il comfort di marcia possa ritenersi maggiore e tratte in cui è minore.

- Si è sviluppata una proposta di metodologia di misura a basso costo per la rappresentazione della regolarità che permetta comunque una adeguata restituzione di tale parametro ai fini dell'implementazione di un sistema di gestione della manutenzione in ambito urbano. In relazione a tale metodologia, le analisi effettuate sembrano evidenziare che l'algoritmo sviluppato riesce a stimare con un accettabile livello di precisione i parametri della curva di regressione ricavata dalla funzione di densità spettrale di potenza dello spostamento verticale "smussata" secondo la procedura proposta dalla norma ISO 8608. Appare inoltre evidente, in prospettiva, che la stima della PSD "rettificata" attraverso semplici misure effettuate con l'ausilio di una barra profilometrica (anche per la possibilità che questa offre di poter calcolare altri indici descrittivi di tipo sintetico come l'IRI), può rappresentare un utile strumento per semplificare valutazioni complesse sulle analisi dei profili stradali.

---

# BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFIA CAPITOLO I

- [1] C.N.R. – Norme tecniche – *Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale* – B.U. n.125/88;
- [2] G. Camomilla, A. Marchionna – *Procedura per il controllo delle caratteristiche superficiali e la programmazione* – Riv. Autostrade n.3, 1992;
- [3] G. Camomilla – *Gestione ed esercizio stradale* – Riv. Autostrade, marzo 1990;
- [4] G. Camomilla et al. – *M.A.P.P.E. : La manutenzione delle pavimentazioni con programmazione elettronica* – Riv Autostrade n.1, 1993;
- [5] ISO 13473-1 – *Characterization of pavement texture by use of surface profiles – determination of Mean Profile Depth* – settembre 1997;
- [6] A.I. Minnella – *Analisi della tessitura del piano viabile* – Tesi di Dottorato – Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Palermo, dicembre 2001;
- [7] S. Cafiso – *Strategie e procedure per la manutenzione delle pavimentazioni stradali* – Convegno di Ragusa, 04 aprile 1998;
- [8] G. Bosciano – *Fondamenti teorici e metodologici per l'analisi della tessitura stradale* – ottobre 2000;
- [9] AIPCR - *Comité Technique des Caracteristiques de Surface* – XIX Congres mondial de la routr, Marrakech 1991;
- [10] B. Crisman, A. Marchionna, R. Roberti - *Fattori stradali da cui dipende l'aderenza* - XXIV Convegno Nazionale Stradale AIPCR, Caratteristiche Superficiali 2000-2003, Saint Vincent-Aosta, Giugno 2002;
- [11] S. Canale, S. Leonardi, F. Nicosia - *Analisi critica del fenomeno dell'aderenza in campo stradale e ferroviario*- Università degli studi di Catania , Istituto Strade Ferrovie Aeroporti , Catania, 1996;
- [12] H.E. Viener et al. – *High and low-speed skidding resistance : the influence of texture on smooth and ribbed tyre friction* – Pavement surface characteristics IV International Symposium Surf2000 – Nantes, 2000;
- [13] B. Faure, J.P. Lavaud – *Aderence et drainabilité* – Reveue Générale des Routes et des Aérodrômes, vol. II, 1993 ;
- [14] J.M. Golden – *A theory of wet road-tyre friction* – Wear, vol. 71, 1981;

- 
- [15] C.N.R. – *Norme per la misura delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni. Metodo di prova per la misura della macrorugosità superficiale con il sistema della altezza di sabbia* – B.U. n.94/83;
- [16] P.G. Roe, S.A. Hartshorne – *The polished stone value of aggregates and in-service skidding resistance* – Transport Research Laboratory – TRL Report 322 – 1998;
- [17] Ph. Denimal – *Le pneumatique et l'adhérence* – Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, maggio-giugno 1993 ;
- [18] N.O. Meyers – *Characterization of surface roughness* – Wear, vol. 5, 1962;
- [19] P.G. Jordan – *Equipment and methods for assessing surface characteristics of a road network* – ASTM STP 1031 – Philadelphia, 1990;
- [20] U. Sandberg – *Development of an international standard for measurement of pavement macrotexture, ISO/DIS 13473-1, ISO/TC 43/SC 1/WG 39 N 21* – PIARC World Congress, Montreal (Canada), 3-9 settembre 1995;
- [21] ASTM E 867-89;
- [22] J. Lucas – *L'analyse de la macrotexture des revêtements routiers* – Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, novembre-dicembre 1991;
- [23] AIPCR Technical Committee on Surface Characteristics (C1) – *International PIARC Experiment to compare and harmonize texture and skid resistance measurements* – AIPCR, 1995;
- [24] G.Bosciano – *Rumore e vibrazioni da traffico. L'influenza delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni* – Cap I “Rumore di rotolamento” – Quaderno AIPCR, Verona, 18/21 maggio 1998;
- [25] P. D. Cenek, J. E. Patrick - *Prediction of Pavement Texture* - Works Central Laboratories, New Zeland;
- [26] M.W. Sayers et S.M. Karamihas – *The little book of profile* - 1997 ;
- [27] AIPCR - Technical Committee on Surface Characteristics (C1) – *Inventory of road surface characteristics measuring equipment* – AIPCR, 1995;
- [28] M.W. Sayers et S.M. Karamihas – *Interpretation of road roughness profile data* – June 1996;
- [29] ISO 13473-3 – *Characterization of pavement texture by use of surface profiles* – Specifications and classification of profilometers – july 1997;
- [30] A.I. Minnella – *Analisi della tessitura del piano viabile* – Tesi di Dottorato – Facoltà di Ingegneria dell'Università degli studi di Palermo, dicembre 2001;

- 
- [31] J.C. Wambold – *State of the art of measurement and analysis of road evenness* - Roadsurf'98 Proceedings, Prague 1998;
- [32] M.W. Sayers – *On the calculation of International Roughness Index from longitudinal road profile* – TRR n. 1501, Transportation Research Board, 1995;
- [33] SHRP – *Distress Identification Manual for the Long - Term Pavement Performance Project* – SHRP-P\_338;
- [34] M.W. Sayers, T.D. Gillespie e W.D.O. Paterson – *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements* – Number HS-093-587, International Bank for Reconstructions and Development (WB – Technical Paper n.46), 1986;
- [35] M.Boulet e G. Descornet – *Harmonization and standardization of test method for the assessment of pavement surface characteristics in Europe* - Roadsurf '98 Proceedings, Prague, 1998;
- [36] L. Carrotti, M. Losa e A. Federici – *A rational method to evaluate safety and riding comfort on road profile* – in Roadsurf'98, Prague, 1998;
- [37] B. Schmidt – *Road unevenness* – 1998;
- [38] M. Prochazka, J. Sprinc e O. Kropac – *Full analysis of true longitudinal profile* - Roadsurf '98 Proceedings, Prague, 1998;
- [39] Innchin Her. Et al – *Development of a data acquisition method for noncontact pavement macrotexture measurement* – Transportation research record 1000, 1986;
- [40] P.W. Arnberg et al. – *The laser road surface tester (RST) : Current status* – september 1991 ;
- [41] M. Gothié – *Le rugolaser trois ans de mesures à grand rendement de la macrorugosité des chaussées* – Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 1989;
- [42] U.Sandberg, P. Anund – *Measurements of macrotexture by the VTI mobile laser profilometer in the PIARC international experiment 1992* – VTI n. TF 52-20, 1992;
- [43] U.Sandberg – *The VTI laser texture profilometers* – 1995;
- [44] Fehrl Investigations on Longitudinal and Transverse Evenness of Road – *Analysis of the longitudinal profiles and indices* - FILTER Experiment, Nantes, 2000;

---

## BIBLIOGRAFIA CAPITOLO II

- [1] AIPCR – *International Experiment to Harmonize Longitudinal and Transverse Profile Measurement and Reporting Procedures* – 1997;
- [2] M.W. Sayers et S.M. Karamihas – *The little book of profile* - 1997;
- [3] J. C. Wambold – *State of the art of measurement and analysis of road evenness* – Roadsurf'98, Prague, 1998;
- [4] M. Boulet, G. Descornet – *Harmonization and standardization of test method for the assessment of pavement surface characteristics in Europe* - Roadsurf'98, Prague, 1998;
- [5] M.W. Sayers et S.M. Karamihas – *Interpretation of road roughness profile data* – June 1996;
- [6] M. Prochazka, J. Sprinc e O. Kropac – *Full analysis of true longitudinal profile* - Roadsurf '98 Proceedings, Prague, 1998;
- [7] M. D'Apuzzo, V. Nicolosi, M. Mattarocci – *Predicting Roughness Progression of Asphalt Pavements by Empirical Mechanistic Model* – 2002;
- [8] ISO 8608 – *Mechanical Vibration–Road Surface profiles–Reporting of measured data* – september 2001;
- [9] Fernando E., Bertrand C., - *Application of Profile Data to Detect Localized Roughness* – Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board No 1813 pp 55-61, 2002
- [10] Fernando E., Rawool S., – *Methodology for Detection of Defect Locations in Pavement Profile* – Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, Issue Number 1905, Transportation Research Board, Washington DC, 2005.
- [11] Lei L., Fwa T. F., Zhe Z. , – *Wavelet analysis and interpretation of road roughness* – Journal of Transportation Engineering, ASCE, February 2005.
- [12] B. Bruscella, V. Rouillard, M. Sek – *Analysis of Road Surface Profiles* – Journal of Transportation Engineering, january/february 1999;
- [13] L. Sun, Z. Zhang, J. Ruth – *Modeling Indirect Statistics of Surface Roughness* - Journal of Transportation Engineering, march/april 2001;
- [14] B. Bruscella, V. Rouillard, M. Sek – *Simulation of Road Surface Profiles* - Journal of Transportation Engineering, may/june 2001;
- [15] M.W. Sayers, T. D. Gillespie, W. O. Paterson – *Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements* – Number HS-093-587, International Bank for Reconstructions & Development (WB-Technical Paper n.46), 1986;

- 
- [16] M.W. Sayers – *On the Calculation of International Roughness Index from Longitudinal Road Profile* – TRR n.501, Transportation Research Board, 1995;
- [17] T. D. Gillespie – *Everything you always to know about IRI, but were afraid to ask!* – Road Profile Users Group Meeting, Nebraska, september 1992;
- [18] Chiu Liu, R. Herman – *Road Profile, Vehicle Dynamics and Ride Qualità Rating* - Journal of Transportation Engineering, march/april 1999;
- [19] Lu Sun – *Developing Spectrum-Based Models for International Roughness Index and Present Serviceability Index* - Journal of Transportation Engineering, november/december 2001.
- [20] Lebas M., Peybernard J., Carta V., - *Méthod de traitement des enregistrements de mesure de densità en continu* - Bull. Liason Laboratoire des Ponts et Chaussées n. 114, Juillet-aoOt 1981.
- [21] Thomas F., - *Statistical approach to road segmentation* -, Journal of Transportation Engineering, vol.129,No.3, 2003, pp. 300-308 ASCE
- [22] Bai J., Perron P., - *Estimating and testing linear models with multiple structural changes* - , Econometrica 66, No.1 I pp. 47-78
- [23] Bai J., Perron P., - *Computation and analysis of multiple structural change models* - , Journal of Applies Econometrics 18, 2003, pp.1-22
- [24] Thomas F., Weniger-Vycudil A, Simanek P., - *Automated segmentation of pavement measurements based on Bayesian ideas: experiences from Austria* -
- [25] Cafiso S., Di Graziano A, Condorelli F., - *Definizioni delle sezioni omogenee nei rilievi su pavimentazioni stradali* -, Strade e Autostrade n.5 Settembre- Ottobre 2000
- [26] Thomas F., - *Generating homogeneous road sections based on surface measurements: available methods* - , Proceedings 2nd European Pavement Management Conference, Berlin, 21-23 Marzo 2004.

---

### BIBLIOGRAFIA CAPITOLO III

- [1] G Giorgio Blanco - *Pavimentazioni in pietra* - Ed.Carocci;
- [2] E. Sterpi – *Le Pavimentazioni* ;
- [3] V.Nicolosi e A. Montella – *I materiali ed i processi costruttivi* ;
- [4] P. Di Mascio – *Le Pavimentazioni di calcestruzzo per le strade urbane* ;
- [5] Siteb – *Quaderno tecnico sulla manutenzione delle pavimentazioni stradali* ;
- [6] Maurizio Crispino - *Analisi di caratteristiche funzionali e strutturali di pavimentazioni in pietra a masselli* - ,X Convegno Nazionale S.I.I.V.,Catania Ottobre 2000;
- [7] M.Crispino, A.Tasora, E.Vaghi, - *Analisi della pericolosità della marcia dei veicoli a due ruote su pavimentazioni lapidee irregolari* ;
- [8] L. Domenichini, R. Ferro, F.La Torre - *Vibrations produced by road traffic influence of the road surface characteristics* ;
- [9] P. Giannattasio, C. Caliendo, L. Esposito, B. Festa, W. Pelliccia – *Portanza dei sottofondi* – Fondazione Politecnica per il Mezzogiorno d'Italia, 1989;
- [10] M.Crispino, L.Venturini,- *Analisi sperimentale su resine poliuretaniche monocomponenti per la sigillatura delle pavimentazioni a masselli in pietra* - XI Convegno Nazionale S.I.I.V. Verona 2001.



---

## APPENDICE A

### ***RICHIAMI DI ANALISI ARMONICA E TEORIA DEI SEGNALE***

#### **A.1 PREMESSA**

L'andamento temporale di un segnale  $x(t)$  è quello tipico dei segnali “aleatori” e non può essere previsto per mezzo di leggi fisiche, note le condizioni iniziali. La caratteristica fondamentale di un segnale aleatorio è proprio legata alla sua non riproducibilità. Se ripetiamo lo stesso esperimento usando un “insieme” di apparati sperimentali equivalenti tra loro, ciascun apparato produrrà un segnale  $x(t)$  con andamento temporale diverso [1].

Tuttavia, anche se non è possibile prevedere l'andamento temporale del segnale generato da ciascun elemento, è comunque possibile caratterizzarne il comportamento d'insieme, introducendo opportuni parametri statistici [2].

Il processo di campionamento è di enorme importanza ai fini della realizzazione dei dispositivi digitali che permettono la misura dei profili stradali. Il contenuto del segnale campionato, dipende dalla relazione fra la frequenza di campionamento impiegata e le componenti minime e massime di frequenza del segnale analogico in ingresso [1].

In oltre, i segnali a tempo discreto spesso sono una versione campionata di segnali a tempo continuo; analogamente i segnali e dati numerici derivano da una quantizzazione di campioni. Ciò è dovuto al fatto che l'elaborazione di segnali analogici si può eseguire vantaggiosamente operando preventivamente una conversione analogica/numerica [1].

Per ben comprendere le dinamiche di analisi di un segnale, è quindi opportuno soffermarsi brevemente sulle leggi del campionamento, e sull'analisi armonica che ne è alla base.

## A.2 CLASSIFICAZIONE FENOMENOLOGICA DEI SEGNALI

Definiremo “segnale” ogni grandezza fisica, generalmente elettrica, associato alla misura di un fenomeno fisico di interesse scientifico [3]:

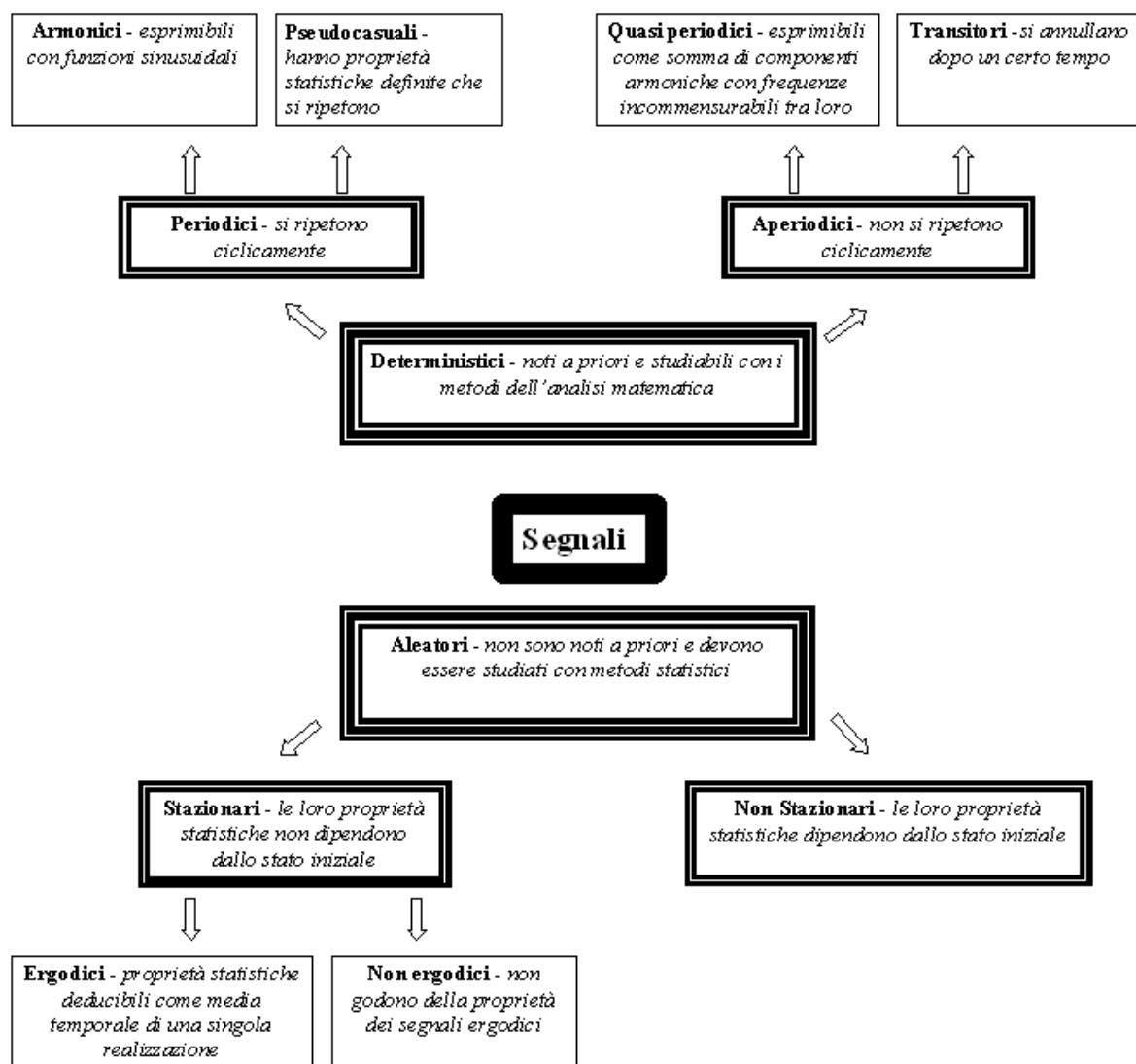
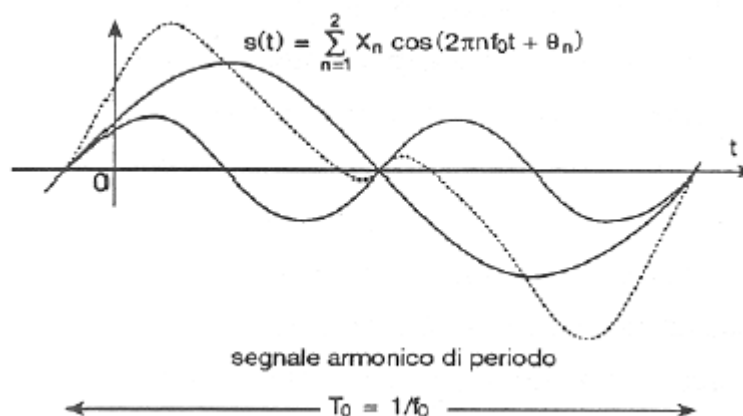


Fig. A.1 – Classificazione fenomenologia dei segnali

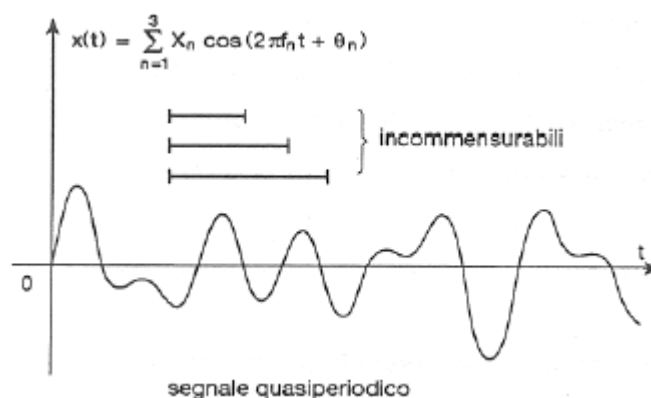
Esempi di segnali secondo tale classifica sono riportati di seguito.

**Segnale Armonico**; è composto dalla somma di più componenti armoniche [3]:



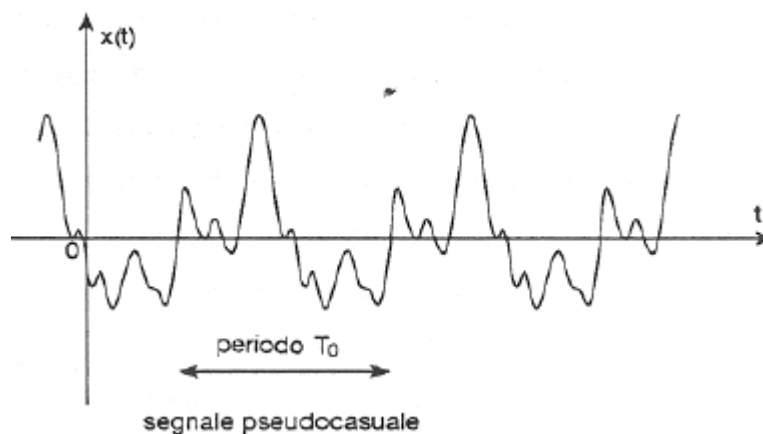
**Fig. A.2** – Esempio di segnale armonico

**Segnale quasi periodico**; è composto dalla somma di più componenti armoniche di periodo incommensurabile [3]:



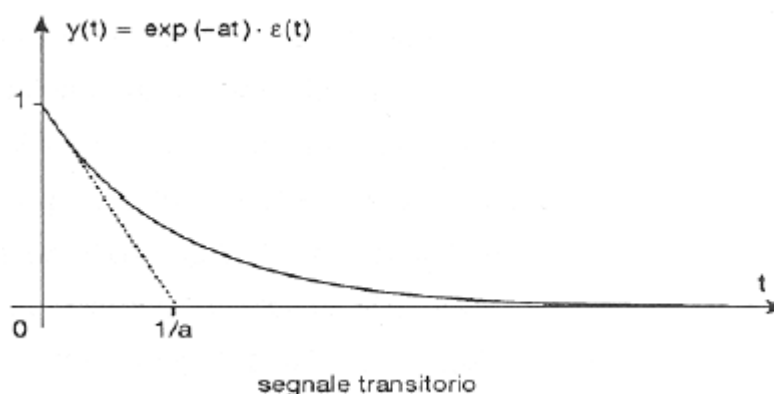
**Fig. A.3** – Esempio di segnale quasi periodico

**Segnale pseudocasuali** ;pur contenendo infinite frequenze all'interno del periodo, si ripete ciclicamente [3]:



**Fig. A.4** – Esempio di segnale

**Segnale transitorio**; all'istante iniziale assume un valore finito e si azzera dopo un tempo sufficientemente distante dall'istante iniziale [3]:



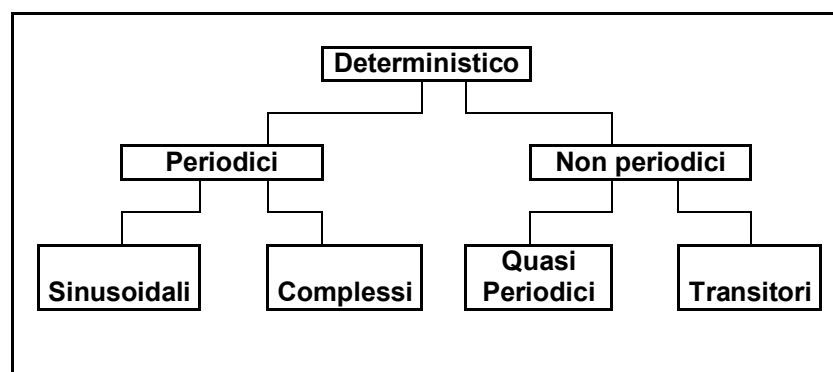
**Fig. A.5** – Esempio di segnale transitorio

Le principali grandezze fisiche associate ad un segnale sono:

- Ampiezza o modulo,  $A$ .
- Fase,  $\varphi$  (rad).
- Pulsazione o frequenza angolare,  $\omega$  (rad/sec).
- Frequenza (Hz),  $f = \omega / (2\pi)$ .
- Periodo  $T = 1/f$  (sec).

### A.3 CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALE DETERMINISTICI

I segnali che rappresentano fenomeni deterministici possono essere catalogati, in prima istanza, in periodici (che si ripetono ciclicamente) e non periodici. Entrambe le categorie si vanno più dettagliatamente specificando secondo quanto riportato nel diagramma seguente[4]:



**Fig. A.6** – Classificazione dei segnale deterministici

---

### A.3.1 SEGNALI PERIODICI SINUSOIDALI

Segnali sinusoidali sono quei particolari tipi di segnali che possono essere definiti matematicamente da funzioni del tipo [4]:

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (1)$$

dove:  $A$  = ampiezza.

$f_0$  = frequenza espressa in cicli per unità di tempo.

$\varphi$  = angolo di fase iniziale.

$x(t)$  = valore istantaneo al tempo  $t$ .

Per cui può scriversi per una funzione sinusoidale [4]:

$$x(\theta) = A_k \sin(k\theta + \varphi_k) = a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta) \quad (2)$$

In cui:

$A_k$  = ampiezza dell'onda alla data frequenza  $k$ .

$\varphi_k$  = angolo di fase alla frequenza  $k$ .

$\theta$  = angolo variabile.

$k$  = frequenze di onde nell'intervallo  $[0 ; 2\pi]$ .

$$A_k \sin(2\pi f t + \varphi_k) = a_k \cos(2\pi f t) + b_k \sin(2\pi f t) \quad (3)$$

dove si ha :

$$\varphi_k = \arctan a_k / b_k$$

Dicesi Serie di Fourier, la somma di infinite funzioni periodiche del tipo (2) [5]:

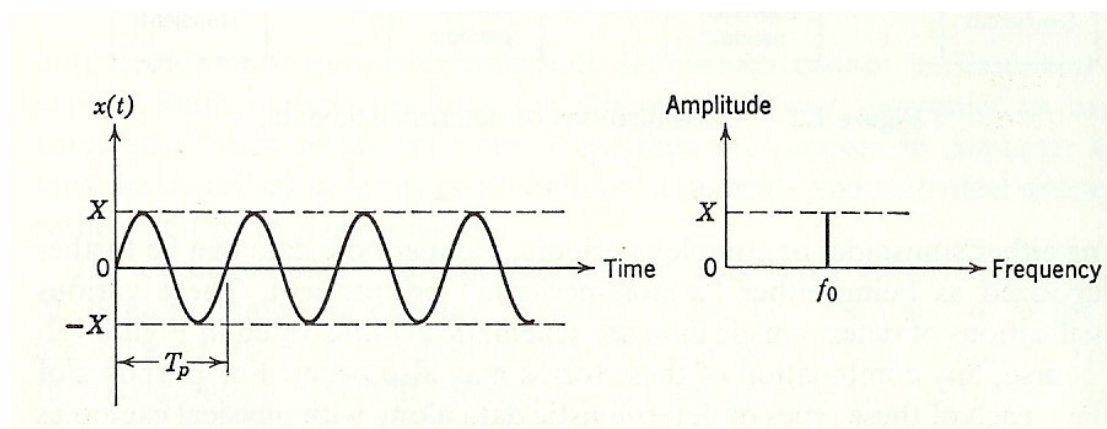
$$x(\theta) = \sum_{k=0}^{\infty} [a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)] \quad (4)$$

dove  $a_k$  e  $b_k$  al variare di  $k$ , rappresentano i coefficienti della serie di Fourier.

Quando si analizzano segnali sinusoidali, solitamente l'angolo di fase è spesso ignorato per cui risulta [4]:

$$x(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$$

L'equazione di sopra può essere descritta da un diagramma di storia temporale (time history) o da un diagramma di frequenza (frequency spectrum), come illustrato nella figura seguente [4]:



**Fig.A.7** – Time history e Frequency spectrum di un segnale sinusoidale

Ovviamente, lo spettro di frequenza è composto da una componente di ampiezza alla specifica frequenza.

L'intervallo di tempo richiesto per compiere un ciclo completo è chiamato periodo  $T$ .

Il numero di cicli per unità di tempo è la frequenza  $f_0$ , la quale può essere sia temporale sia spaziale [3].

### A.3.2 SEGNALI QUASI PERIODICI

Un segnale qualsiasi, può essere scomposto in una somma o un integrale di funzioni armoniche [3].

L'insieme delle frequenze delle armoniche contenute nel segnale e dei relativi moduli e fasi costituiscono il contenuto in frequenza del segnale [3].

Un segnale costituito dalla somma di due o più funzioni seno di frequenze commensurabili, sarà periodico [4].

Più in generale, un segnale formato dalla somma di due o più funzioni seno con frequenze arbitrarie, sarà non periodico [4].

Prende il nome di Analisi di Fourier o Analisi Armonica il calcolo dei valori  $A_k$  e  $\phi_k$  (ampiezza ed angolo di fase) delle varie onde in cui può essere scomposta una funzione  $x(\theta)$  serie di Fourier [6].

Si può dimostrare [6], che se una funzione  $x(t)$  definita in un intervallo  $[t_1 ; t_2]$  è ivi finita e presenta un numero finito di estremi, essa può essere scomposta in una somma di funzioni del tipo ( 2 ) e cioè in una serie di Fourier. La funzione serie che ne deriva sarà periodica in  $[t_1 ; t_2]$ .

Indicando quindi con  $T$  l'ampiezza dell'intervallo  $t_2 - t_1$  , dovendo solo mutare l'angolo di fase possiamo porre  $t_1=0$ .

Supponendo pertanto che  $x(t)$  rispetti ciò che si è detto per  $t \in [0, T]$ , risulterà:

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{per } t=0 \\ 2\pi & \text{per } t=T \end{cases}$$

quindi:

$$\theta = 2\pi t/T$$

con riferimento all'equazione ( 4 ), si dimostra [6] che per  $k \geq 1$ :

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) dt \quad (5)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) dt \quad (6)$$

con  $k=1,2,\dots,\infty$

e dove  $a_k$  e  $b_k$  sono i coefficienti della serie di Fourier.

Per  $k=0$  il coefficiente  $b_0$  non interessa, mentre per  $a_0$  si avrà:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Quindi modificando la ( 4 ), la serie di Fourier si esprime come [4]:

$$x(t) = x[\theta(t)] = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)] \quad (7)$$

L'obiettivo della serie di Fourier è approssimare funzioni periodiche qualsiasi con somme di seni e coseni [4]. La funzione  $x(t)$  viene espressa come somma di funzioni seno e coseno (con frequenze multiple della fondamentale) moltiplicate per dei coefficienti numerici da calcolare in funzione del tipo di segnale in esame.

Per quanto riguarda le applicazioni pratiche, la funzione  $x(t)$  non viene fornita come espressione algebrica, ma mediante un campionamento: cioè viene fornita una serie di valori  $x_j$  verificatisi agli istanti  $t_j$ . Spesso gli istanti sono individuati equamente spaziatati all'interno del periodo  $T$  oppure, in termini di angoli, nell'intervallo di ampiezza  $2\pi$ . Per tale motivo, se indichiamo con  $n$  il numero di osservazioni, lo spazio tra due successive sarà [6]:

$$\Delta t = \frac{T}{n}$$

ed in termini di angolo:

$$\Delta \theta = \frac{2\pi}{n}$$

Nel caso continuo può porsi  $\Delta t \rightarrow 0$  e  $n \rightarrow \infty$ .

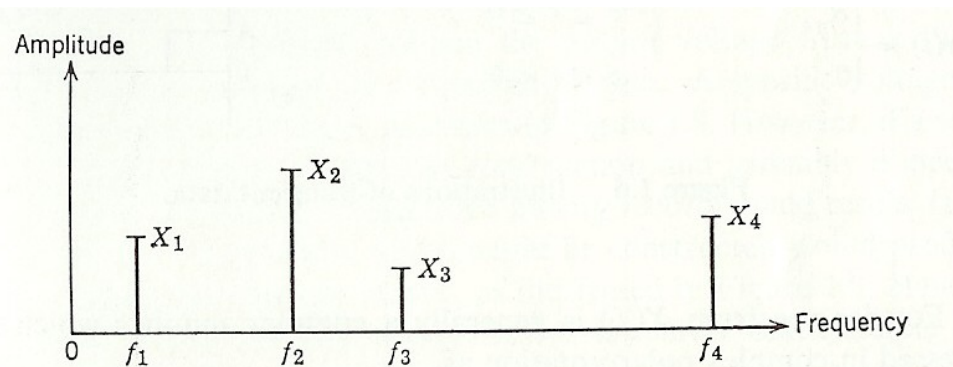
La serie di Fourier per dati discreti equamente spaziatati può quindi essere scritta come [4]:

$$x_j = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ A_k \cos \left( 2\pi k \frac{j}{k} - \varphi_k \right) \right] \quad (8)$$

Alla luce di quanto detto, possiamo quindi affermare che un fenomeno fisico produce un segnale quasi periodico quando gli effetti di due o più segnali periodici non correlati vengono mixati [4].

Individuate le ampiezze  $A_k$ , il diagramma di queste in funzione della frequenza  $k$  prende il nome di spettro delle ampiezze, che, nel caso di dati campionati, risulta essere una funzione discreta come illustrato nella figura sottostante [4]:



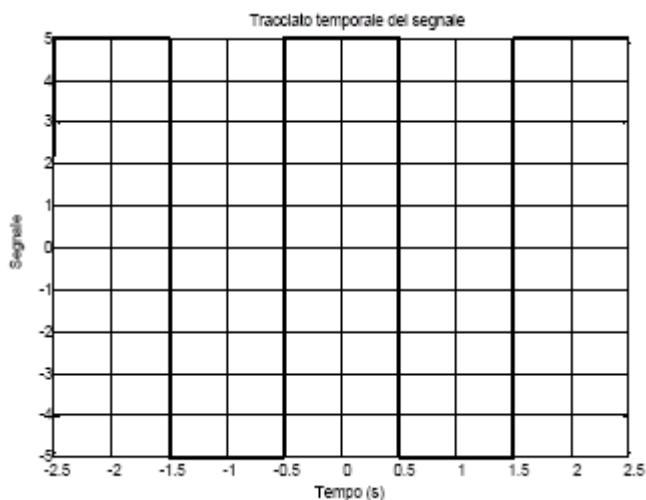


**Fig. A.8** – Spettro di un segnale quasi periodico

Un segnale quasi periodico, può essere rappresentato da uno spettro di frequenza simile a quello di un segnale periodico complesso; la sola differenza è che le frequenze delle singole componenti non sono rappresentate da numeri razionali [4].

Sfruttando quanto detto in questo paragrafo, è quindi possibile ricostruire una funzione periodica attraverso la serie di Fourier.

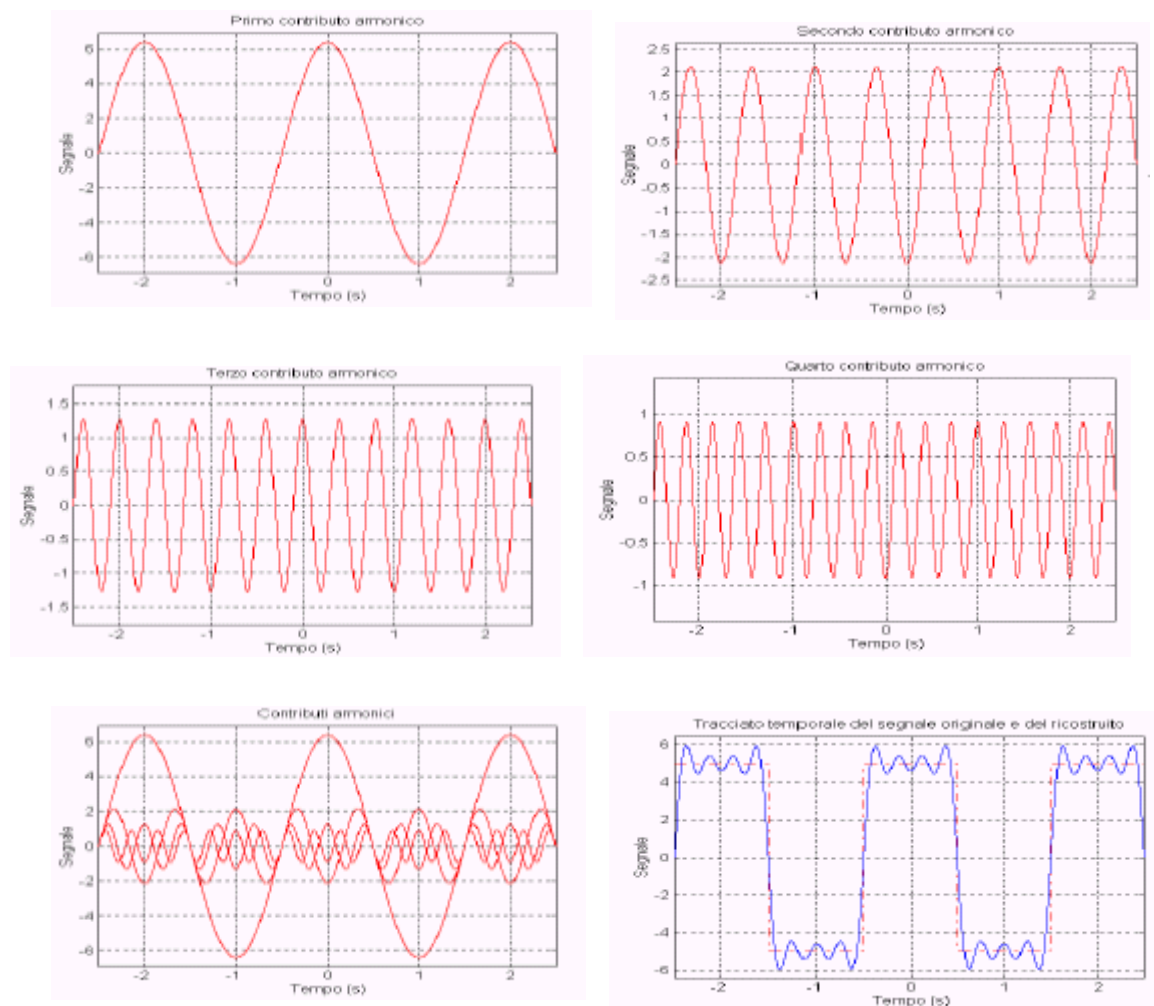
Consideriamo, ad esempio, un'onda quadra [3]:



**Fig. A.9** – Esempio di onda quadra rappresentante il segnale originale

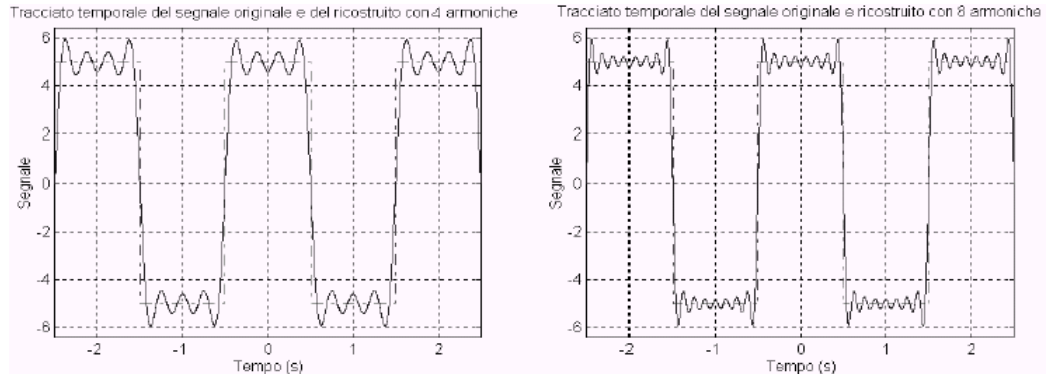
attraverso le formule ( 5 ) e ( 6 ) si calcolino i coefficienti  $a_k$  e  $b_k$  e quindi si approssima l'onda quadra con la serie di Fourier troncata al settimo termine.

Si noti che i coefficienti  $a_k$ , compreso l' $a_0$ , risultano nulli essendo l'onda quadra un segnale pari [3]:



**Fig. A.10** – Ricostruzione di un onda quadra attraverso onde armoniche a diverse frequenze

Nella ricostruzione di un segnale particolare rilevanza ha il fenomeno di Gibbs: in corrispondenza ad ogni discontinuità del segnale originale vi è sempre una sovrelongazione che vale l' 8.95% della discontinuità stessa. Nell'onda quadra si hanno discontinuità ogni volta che si passa da 5 a -5 e viceversa. L'ampiezza della discontinuità è pari a 10. La sovrelongazione non potrà essere inferiore a 0.895 [3]:



**Fig. A.11** – Rappresentazione del fenomeno di Gibbs

### A.3.3 SEGNALI PERIODICI COMPLESSI

Un segnale periodico complesso, è quel tipo di segnale periodico che può essere matematicamente definito da una funzione variabile del tempo che si ripete ad intervalli regolari come [4]:

$$x(t) = x(t \pm kT) \quad \text{con } k=1,2,3\dots$$

Come per i segnali sinusoidali, l'intervallo di tempo necessario per un intero è chiamato periodo  $T$  ed il numero di cicli per unità di tempo è la frequenza  $f$ .

In pratica, un segnale periodico complesso può esprimersi attraverso la formula [4]:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos 2\pi f t + b_k \sin 2\pi f t] \quad (9)$$

dove :  $f=1/T$  e  $a_k$  e  $b_k$  sono determinati attraverso le formule ( 5 ) e ( 6 ).

E' dunque necessario calcolare le quantità  $a_k$  e  $b_k$  ;per ridurre la quantità di calcoli si può però adoperare la notazione complessa, che ha il vantaggio di richiedere la determinazione dei soli coefficiente  $x(k)$  [3].

Ricordando che [3]:

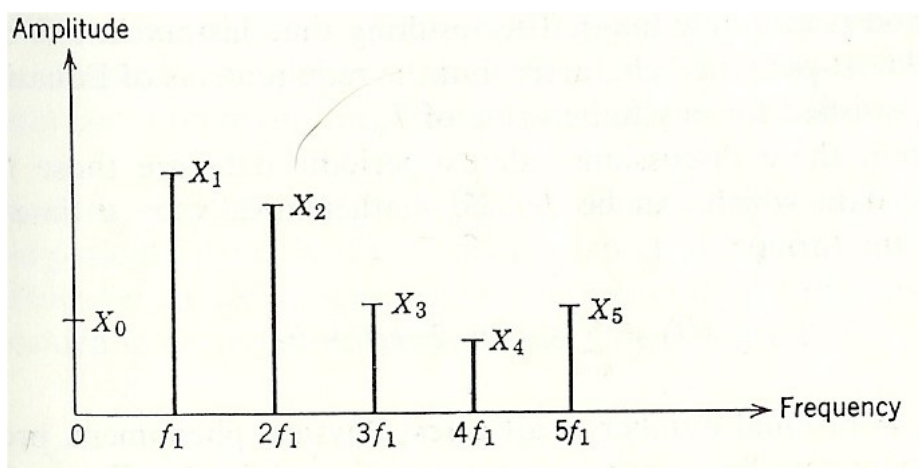
$$e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t) \quad (10)$$

sfruttando gli sviluppi in serie di Mc Laurin delle funzioni  $\sin$  e  $\cos$  e sostituendoli nella ( 9 ), possiamo scrivere [6]:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) e^{j 2\pi k \frac{t}{T}} \quad \text{con } k=1,2,\dots,\infty \quad (11)$$

$$x(k) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} dt \quad \text{con } k = 1, 2, \dots, \infty \quad (12)$$

Quando analizziamo un segnale periodico l'angolo di fase è spesso ignorato, in tal caso l'equazione di un segnale periodico complesso è ben rappresentata da uno spettro discreto del tipo riportato in figura [4]:



**Fig. A.12** – Spettro di un segnale periodico complesso

### A.3.4 SEGNALI NON PERIODICI TRANSITORI

Sono transitori tutti quei segnali non periodici e non discussi precedentemente, i quali possono essere espressi attraverso appropriate funzioni variabili del tempo.

Un'importante caratteristica dei segnali transitori, che li differenzia dai periodici complessi e dai quasi periodici, è che per essi, come vedremo in seguito, non è possibile una rappresentazione spettrale discreta [4].

L'Analisi di Fourier, presuppone che la funzione  $x(t)$ , definita o campionata nell'intervallo di ampiezza  $T = t_2 - t_1$ , sia periodica di periodo  $T$ .

Tale analisi può essere applicata anche alle funzioni  $x(t)$  non periodiche, assumendo però che la funzione sia nulla all'esterno dell'intervallo  $(t_1 ; t_2)$  [6].

Per impostare l'analisi per tale tipo di funzioni si suppone inizialmente che la  $x(t)$  sia periodica di un intervallo  $T$  di ampiezza  $n\Delta t$ , quindi si fa tendere  $n \rightarrow \infty$  ponendo  $x(t) = 0$  per  $t = n\Delta t$  esterno all'intervallo originario di ampiezza  $T$ .

Supponendo in prima ipotesi la  $x(t)$  funzione pari, saranno nulli i coefficienti  $b_k$  e risulterà, nel caso continuo [6]:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos\left(2\pi k \frac{t}{T}\right) dt = \frac{2}{n\Delta t} \int_{-\frac{n\Delta t}{2}}^{\frac{n\Delta t}{2}} x(t) \cos\left(2\pi k \frac{t}{n\Delta t}\right) dt$$

e nel caso discreto:

$$a_k = \frac{2}{n} \sum_{j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} x_j \cos\left(2\pi k \frac{j}{n}\right)$$

Al tendere di  $n \rightarrow \infty$  si può notare che l'integrale di sopra non cambia (la funzione  $x(t)$  è nulla per  $t$  esterno a  $\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$ ), mentre il coefficiente anteposto  $\frac{2}{n\Delta t} \rightarrow 0$ .

Ciò implica che le ampiezze delle onde componenti tendono a ridursi per  $n \rightarrow \infty$ .

Si considera pertanto, anziché l'ampiezza  $a_k$  della generica onda di frequenza  $k$ , la densità di ampiezza  $a_f$  funzione della frequenza  $f$  definita come segue [6]:

$$f = \frac{k}{n\Delta t} = \frac{k}{T}$$

$$a(f) = \frac{n\Delta t}{2} a_k = \frac{T}{2} a_k = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cos\left(2\pi k \frac{t}{n\Delta t}\right) dt$$

La frequenza  $f$  si misura in cicli per unità di  $t$ .

La  $a_f$  è più notoriamente scritta come [6]:

$$a(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cos(2\pi f t) dt$$

e si chiama trasformata cosinusoidale della  $x(t)$ .

Allo stesso modo, per una funzione  $x(t)$  dispari, saranno nulli gli  $a_k$  e con procedimento analogo si otterrà [6]:

$$b(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \sin(2\pi f t) dt$$

nota come trasformata sinusoidale della  $x(t)$ .

Riferendosi alla forma complessa della serie di Fourier, in luogo dei coefficienti  $x(k)$  si adottano i coefficienti [6]:

$$X(f) = n\Delta t x(k) = a(f) - jb(f) \quad (13)$$

ottenendo la nuova espressione della serie di Fourier nel caso continuo [6]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \quad (14)$$

dalla quale può ricavarsi la  $X(f)$  [6]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (15)$$

L'integrale  $X(f)$  prende il nome di trasformata di Fourier di  $x(t)$  e consente di passare dal dominio del tempo al dominio delle frequenze [4], mentre l'integrale  $x(t)$  è chiamata antitrasformata o trasformata inversa di Fourier di  $X(f)$  e consente di passare dal dominio delle frequenze a quello del tempo [4]. Tramite l'antitrasformata, la  $x(t)$  viene espressa come l'integrale di infiniti contributi armonici; la  $X(f)$  fornisce il modulo del contributo alla generica frequenza  $f$ , ma è necessario saperne la fase, altrimenti non si possono sommare [4].

Il segnale originario è nel dominio del tempo, ma viene trasformato in una “somma” di segnali sinusoidali a tutte le frequenze.

Dunque, se la funzione è periodica possiamo scrivere la serie di Fourier, ma anche se la

funzione non è periodica, ma soddisfa la condizione di Dirichlet  $\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt < \infty$ , la si può

esprimere come “somma” di funzioni armoniche [4]. Mentre nella serie di Fourier sono presenti solo le frequenze multiple della principale, nella Trasformata di Fourier compaiono tutte le frequenze [4] e la formulazione, che nel caso della Serie coinvolgeva una sommatoria, nel caso della Trasformata diventa un'integrale [4].

La Trasformata di Fourier è un operatore complesso, ed in quanto tale può essere espressa attraverso parte reale ed immaginaria oppure tramite modulo e fase [3].

La  $X(f)$  viene anche detta trasformata spettrale complessa della  $x(t)$ , o ancora densità spettrale di frequenza [4]. I diagrammi in termini di modulo e fase della Trasformata di Fourier costituiscono in tutto e per tutto il contenuto in frequenza del segnale [3].

Poiché la Trasformata di Fourier è una funzione complessa, le componenti armoniche presenti nel segnale non sono più discrete: si dice quindi che il contenuto o spettro in frequenza di un segnale non periodico è uno spettro continuo [4]. In pratica in un segnale transitorio, o comunque non periodico, sono presenti tutte le frequenze [4].

Riguardo alle proprietà della Trasformata di Fourier, è da segnalare che funzioni dispari nel dominio del tempo si trasformano in funzioni dispari ed immaginarie nel dominio

delle frequenze [6]. Tornando per analogia alla serie di Fourier, la  $x(t)$  si otterrebbe come somma di soli seni, tutti i coefficienti  $b_k$  sarebbero nulli, per cui la trasformata di una funzione dispari coincide con la trasformata sinusoidale della funzione stessa, moltiplicata per  $j$  [3].

Funzioni pari nel dominio del tempo si trasformano in funzioni pari e reali nel dominio delle frequenze; tornando per analogia alla serie di Fourier, la  $x(t)$  si otterrebbe come somma di soli coseni, tutti i coefficienti  $a_k$  sarebbero nulli, per cui la trasformata di una funzione pari risulta essere la trasformata cosinusoidale della funzione stessa [3].

## A.4 TEOREMA DELLA CONVOLUZIONE

Siano  $x(t)$  e  $h(t)$  due funzioni di cui diciamo  $X(f)$  e  $H(f)$  i rispettivi spettri [6]:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Lo spettro della funzione ottenuta dal prodotto tra  $x(t)$  e  $h(t)$  si indica con:

$$F[x(t)h(t)] = X(f) * H(f)$$

dove l'operazione tra  $X(f)$  e  $H(f)$ , e denotata con un asterisco  $*$  è chiamata convoluzione, la cui espressione matematica è la seguente:

$$F[x(t)h(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)H(f_1 - f)df$$

Tra le convoluzioni di due funzioni e le loro trasformate, sussistono le seguenti relazioni:

$$F[x(t)h(t)] = X(f) * H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)H(f_1 - f)df$$

$$F[x(t) * h(t)] = F\left[\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h(t_1 - t)dt\right] = X(f)H(f)$$

Da tali espressioni, si nota che in riferimento alle funzioni  $x(t)$  e  $h(t)$  nel dominio del tempo e alle loro trasformate  $X(f)$  e  $H(f)$  in quello delle frequenze, alla convoluzione del dominio del tempo corrisponde un prodotto nel dominio delle frequenze e viceversa al

---

prodotto nel dominio del tempo corrisponde una convoluzione nel dominio delle frequenze [6].

## A.5 CLASSIFICAZIONE DEI SEGNALE ALEATORI

Un segnale rappresentativo di un fenomeno fisico aleatorio non può essere descritto in forma chiusa da un'unica espressione matematica, ciò perché ogni osservazione rappresenta solo uno dei possibili risultati [4].

Una singola storia temporale rappresentativa di un fenomeno aleatorio, è chiamata funzione campione [4]. L'insieme di tutte le possibili funzioni campione la cui media produce il fenomeno aleatorio, si chiamano processo aleatorio o processo stocastico [4]. Lo studio dei segnali random, come verrà più diffusamente esposto in seguito, utilizza la teoria dei processi aleatori.

Le problematiche connesse ai segnali aleatori non possono essere analizzate su basi deterministiche, ma è necessario un approccio statistico [4].

Molti fenomeni random mostrano una particolare regolarità statistica nel senso che, pur essendo le diverse storie temporali differenti tra loro, alcune grandezze medie rimangono costanti [7]. In tal caso i processi random possono essere descritti da pochi parametri statistici e da funzioni statistiche opportune, come ad esempio la funzione densità spettrale di potenza [7].

I segnali aleatori possono essere classificati innanzitutto in non stazionari e stazionari, i quali a loro volta si distinguono in ergodici e non ergodici [4]:

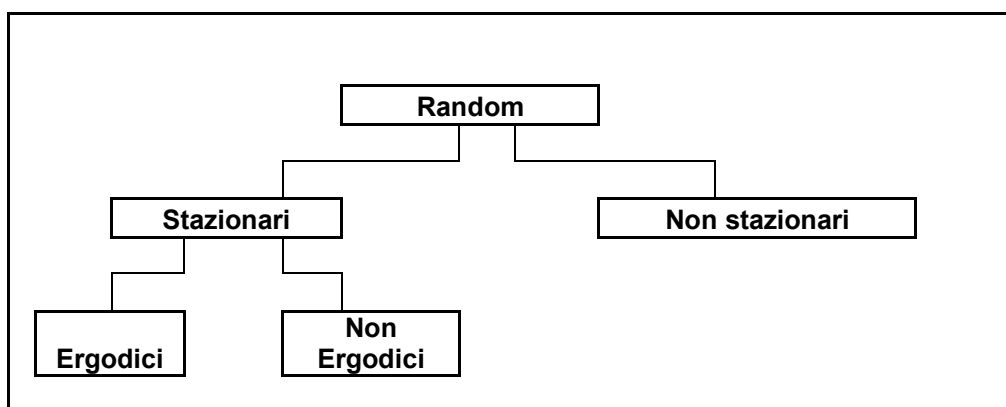


Fig. A.13 – Classificazione dei segnali aleatori



---

### A.5.1 SEGNALI ALEATORI STAZIONARI

Quando un fenomeno fisico è assimilabile ad un processo aleatorio, le proprietà del segnale possono essere ipoteticamente descritte, in ogni istante di tempo, computando la media dei valori dell'insieme di tutte le funzioni campione che descrivono il processo [4].

Preso un'insieme di funzioni campione che descrivono un processo aleatorio, il valore medio (momento primo) del processo, ad un qualsiasi tempo  $t_1$ , può essere computato prendendo il valore istantaneo di ogni funzione campione allo stesso tempo  $t_1$ , sommando tali valori e dividendo per il numero di funzioni campione [4].

Allo stesso modo, la correlazione tra i valori del processo aleatorio a due differenti istanti di tempo (chiamata funzione di autocorrelazione), può essere computata prendendo la media dei prodotti dei valori ai due differenti istanti di tempo  $t_1$  e  $t_1 + \tau$  [4].

Per un processo aleatorio  $\{x(t)\}$ , dove il simbolo  $\{ \}$  è usato per denotare l'insieme di funzioni campione, il valore medio  $\mu_x(t_1)$  e la funzione di autocorrelazione  $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$  sono così espressi [7]:

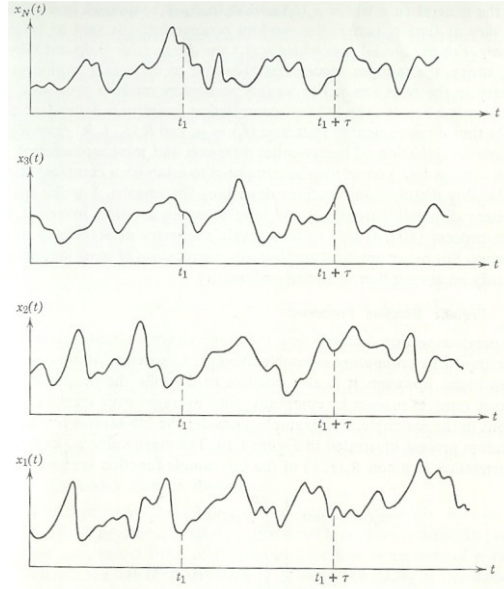
$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \quad (16)$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad (17)$$

Nel caso generale, dove le funzioni  $\mu_x(t_1)$  e  $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$  variano al variare del tempo  $t_1$ , il processo è detto non stazionario [4],[7]. Nel caso particolare in cui le due funzioni non variano al variare del tempo, il processo aleatorio  $\{x(t)\}$  è detto stazionario in senso largo [4], [7]. Per tali processi, il valor medio è costante, e la funzione autocorrelazione dipende solo dall'ampiezza dell'intervallo,  $\tau$ ; quindi possiamo scrivere [4]:

$$\mu_x(t_1) = \mu_x$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = R_{xx}(\tau) .$$



**Fig. A.14** – Insieme di funzioni campione che evidenziano la stazionarietà del processo

Nel caso in cui anche tutti i momenti di ordine superiore al primo fossero invarianti rispetto al tempo, il processo aleatorio  $\{x(t)\}$  si definisce strettamente stazionario o stazionario in senso stretto [4], [7].

### A.5.2 SEGNALI ALEATORI ERGODICI

In molti casi, è possibile descrivere le proprietà di un processo aleatorio stazionario valutando le medie di una funzione di campionamento dell'insieme.

Considerata la  $k$ -esima funzione di campionamento del processo aleatorio, il valore medio  $\mu_x(k)$  e la funzione di autocorrelazione  $R_{xx}(\tau, k)$  si esprimono come [7]:

$$\mu_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad (18)$$

$$R_{xx}(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t + \tau) dt \quad (19)$$

Se il processo  $\{x(t)\}$  è stazionario e la media e l'autocorrelazione definite dalle equazioni ( 18 ) e ( 19 ) non variano al variare della  $k$ -esima funzione di

---

campionamento, il processo aleatorio è detto ergodico [7].

Per un processo ergodico il valore medio e la funzione di autocorrelazione in corrispondenza di uno stesso istante temporale, sono uguali per ogni funzione di campionamento appartenente all'insieme che definisce il processo [4].

Si può quindi scrivere [7]:

$$\mu_x(k) = \mu_x$$

$$R_{xx}(\tau, k) = R_{xx}(\tau)$$

Va specificato che solo un processo aleatorio stazionario può essere ergodico.

In generale, la generica variabile aleatoria  $x_k(t)$  non è rappresentativa dell'intero processo tranne che per processi aleatori definiti come stazionari ed ergodici per i quali, come vedremo più dettagliatamente in seguito, è possibile ricavare le informazioni statistiche dell'intero processo dall'analisi di una sua sola variabile [7].

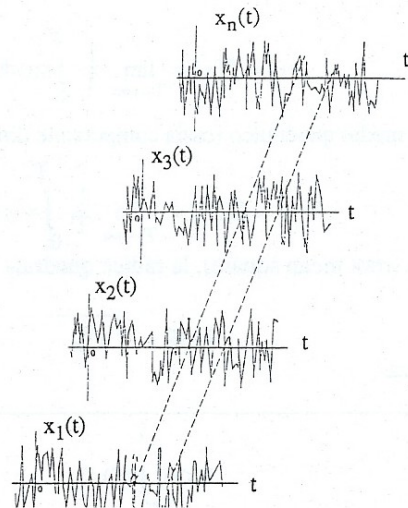
## A.6 PROCESSI STOCASTICI

Come accennato in precedenza, ogni qual volta si vuole studiare un fenomeno di cui non si riesce a dedurre la legge fisica che lo sorregge, ci si riferisce alla statistica quale scienza in grado di derivare leggi le quali forniscono la probabilità che il fenomeno si verifichi in una certa maniera [7].

Consideriamo un generico esperimento in cui si misura una grandezza aleatoria.

Sia  $x_1(t)$  una storia temporale; misurando la stessa grandezza, in corrispondenza di analoghe condizioni di prova, è possibile misurare una seconda storia temporale  $x_2(t)$ : tale storia temporale sarà differente da quella precedente,

Ripetendo numerose misurazioni ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) è possibile ottenere una sequenza di registrazioni del tipo riportato in figura [7]:



**Fig. A.15** – Rappresentazione di un processo stocastico

La generica storia temporale  $x_k(t)$  con  $(k = 1, 2, \dots, N)$ , viene definita come variabile random, o funzione campione.

Il processo di acquisizione di tali funzioni è detto campionamento.

L'intero assieme delle storie temporali rappresenta il cosiddetto processo aleatorio o processo stocastico che rappresenta l'insieme di tutti gli eventi possibili, cioè la popolazione [7].

### A.6.1 CLASSIFICAZIONE DEI PROCESSI STOCASTICI

Diciamo  $x$  un processo stocastico e denotiamo con  $x(t)$  la generica funzione campione, essendo  $t$  la variabile da cui dipende la funzione stessa.

Si definisce insieme di funzioni campione, un set di funzioni campione che indichiamo con [7]:

$$\{x(t)\} \equiv \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)\}$$

Per  $N \rightarrow \infty$  il simbolo  $\{x(t)\}$  indica l'intero processo.

I momenti statistici (media, varianza, autocorrelazione, ecc.) possono essere calcolati sia rispetto alla variabile  $t$  che rispetto alla variabile  $N$ .

Diciamo valore medio del processo all'istante  $t_1$ , la funzione del tempo espressa dalla formula ( 16 ), che rappresenta la media dei valori che le funzioni campione assumono

---

all'istante  $t_1$ ; si chiama funzione di autocorrelazione del processo, all'istante  $t_1$  e relativo al ritardo  $\tau$ , la funzione del tempo espressa dalla ( 17 ), la quale fornisce un indice della correlazione esistente tra valori di una stessa funzione campione spaziatati di un ritardo  $\tau$  [4].

Se  $\mu_x(t_1)$  e  $R_{xx}(t_1, t_1 + \tau)$  assumono valori differenti al variare di  $t_1$ , il processo  $\{x(t)\}$  si dice non stazionario. Se invece tali valori non cambiano al variare di  $t$ , cioè se [7]:

$$\mu_x(t_1) = \mu_x$$

$$R_{xx}(t_1, t_1 + \tau) = R_{xx}(\tau)$$

il processo si dice debolmente stazionario. Se infine la indipendenza dall'istante  $t_1$  si verifica per tutti i momenti statistici, il processo  $\{x(t)\}$  si dice fortemente stazionario.

Come detto in precedenza, i momenti statistici possono essere calcolati anche rispetto al tempo  $t$ . Fissata una funzione campione  $x_k(t)$  il valor medio  $\mu_x(k)$  relativo a tale funzione si determina attraverso la ( 18 ) e la funzione di autocorrelazione  $R_{xx}(\tau, k)$  è ricavabile dalla ( 19 ).

Se il processo è stazionario e  $\mu_x(k)$  e  $R_{xx}(\tau, k)$  non variano al variare della funzione campione, cioè se :

$$\mu_x(k) = \mu_x$$

$$R_{xx}(\tau, k) = R_{xx}(\tau)$$

il processo è detto ergodico [7].

E' quindi possibile affermare che per processi ergodici il valore medio  $\mu_x$  e la funzione di autocorrelazione  $R_{xx}(\tau)$  sono le stesse, sia se computate su un'insieme di funzioni campione che su una sola funzione campione [7].

Per i processi stocastici ergodici, le caratteristiche possono essere analizzate esaminando una sola funzione campione, campionata per un intervallo di tempo  $T$  sufficientemente grande da poterlo considerare infinito [7].

---

## A.6.2 PARAMETRI DESCRITTIVI DELLE CARATTERISTICHE DI UN PROCESSO ALEATORIO

Detto  $\{x(t)\}$  un processo aleatorio ergodico, relativamente ad una singola funzione campione  $x(t)$  possono individuarsi alcuni parametri che descrivono l'andamento statistico della funzione stessa.

- Media temporale della funzione campione [7]:

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (20)$$

tale parametro fornisce la posizione dei valori assunti dalla  $x(t)$  nel suo dominio di esistenza.

- Varianza nel tempo della  $x(t)$  [7]:

$$\sigma_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x]^2 dt \quad (21)$$

La varianza  $\sigma_x^2$  fornisce la dispersione dei valori assunti dalla  $x(t)$  intorno al valore medio  $\mu_x$ .

- Deviazione standard [7]:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} \quad (22)$$

- Valore quadratico medio [7]:

$$\Psi_x^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (23)$$

Il valore quadratico medio  $\Psi_x^2$  indica l'intensità con cui i valori  $x(t)$  si verificano.

In oltre risulta sussistere l'uguaglianza [7]:

$$\sigma_x^2 = \Psi_x^2 - \mu_x^2$$

- Radice quadratica media o rms (root mean square) [7]:

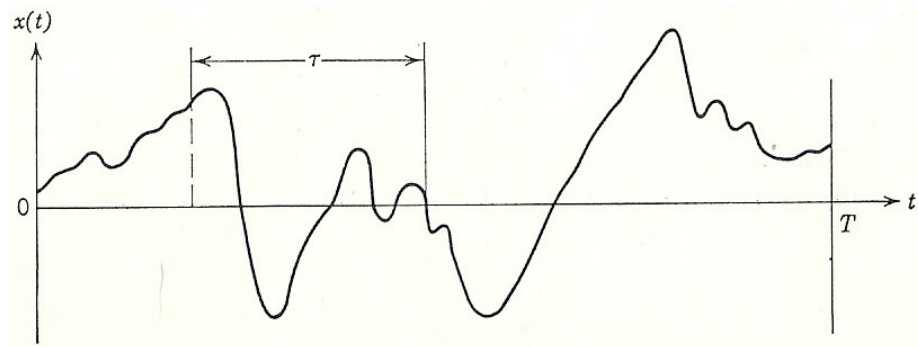
$$rms = \sqrt{\Psi_x^2}$$

### A.6.2.1 FUNZIONE AUTOCORRELAZIONE

Altra grandezza d'interesse è la funzione di autocorrelazione, definita come [7]:

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt \quad (24)$$

Essa descrive la dipendenza tra i valori della  $x(t)$  e gli stessi valori ottenuti dopo un certo ritardo  $\tau$  [4].



**Fig. A.16** – Ritardo  $\tau$  nel computo della funzione autocorrelazione

Dalle definizioni date si riscontra subito che [7]:

$$R_{xx}(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau)dt = \Psi_x^2 \quad (25)$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} R_{xx}(\tau) = \mu_x$$

In oltre si nota che l'autocorrelazione è una funzione sempre reale e pari, per cui [4]:

---


$$R_{xx}(-\tau) = R_{xx}(\tau)$$

e che essa ammette un massimo assoluto in  $\tau=0$  [4]:

$$\max R_{xx}(\tau) = R_{xx}(0) = \Psi_x^2$$

La funzione autocorrelazione  $R_{xx}(\tau)$  è legata al valore quadratico medio  $\psi_x^2$  tramite la trasformata di Fourier attraverso la relazione [7]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \frac{1}{2} \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(f, \Delta f)}{\Delta f} \quad (26)$$

dove  $\psi_x^2(f, \Delta f)$  è il valore quadratico medio calcolato per i valori di  $x(t)$  di frequenza compresa tra  $f$  e  $f + \Delta f$ .

La funzione di autocorrelazione viene spesso definita in forma dimensionale come [7]:

$$\overline{R_{xx}} = \frac{R_{xx}(\tau)}{R_{xx}(0)} = \frac{R_{xx}(\tau)}{\Psi_x^2} \Rightarrow -1 < \overline{R_{xx}}(\tau) < 1$$

Per  $\overline{R_{xx}}(\tau) = 1$  si ha la massima correlazione; per  $\overline{R_{xx}}(\tau) = 0$  si ha correlazione nulla; per  $\overline{R_{xx}}(\tau) = -1$  si ha la massima correlazione, ma le variazioni sono in controfase.

#### A.6.2.2 FUNZIONE CROSSCORRELAZIONE

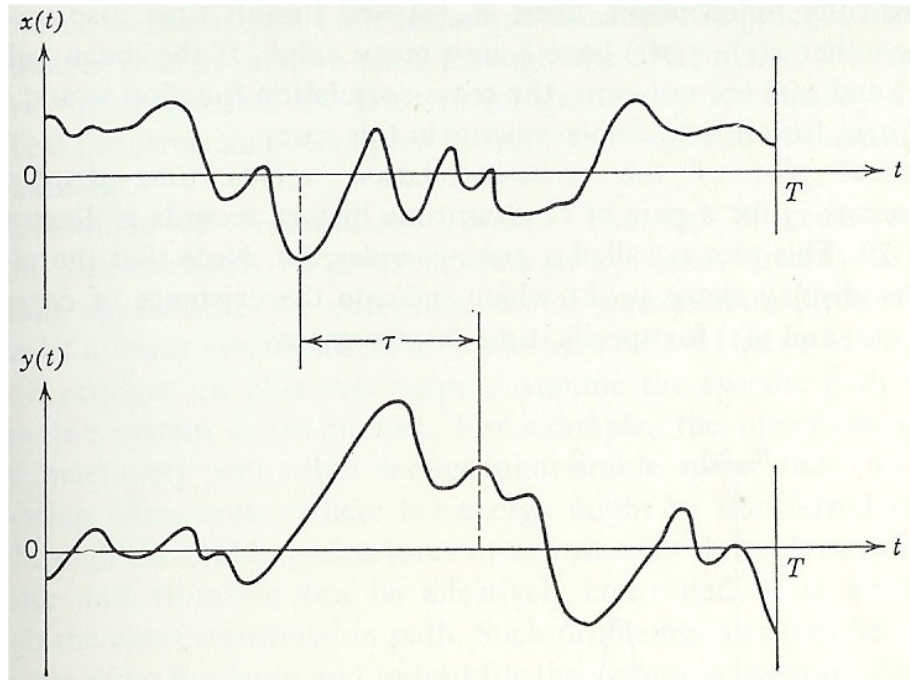
Siano  $\{x(t)\}$  ed  $\{y(t)\}$  due processi stocastici ergodici e siano  $x(t)$  e  $y(t)$  due rispettive funzioni campione.

Si definisce funzione di crosscorrelazione e si indica con  $R_{xy}$  la funzione [7]:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t + \tau) dt \quad (27)$$

Tale funzione fornisce l'andamento della dipendenza fra  $x$  e  $y$  in funzione del ritardo  $\tau$  di  $y$  rispetto ad  $x$ , come illustrato nei grafici sottostanti [4]:





**Fig. A.17** - Funzioni campione  $x$  ed  $y$  rappresentative di due processi stocastici

La funzione  $R_{xy}(\tau)$  è sempre una funzione reale la quale può essere positiva e negativa e non ha necessariamente un massimo per  $\tau = 0$  [4].

In oltre per tale funzione, contrariamente a quella di autocorrelazione, non vale la parità in quanto risulta [7]:

$$R_{xy}(\tau) \neq R_{xy}(-\tau)$$

ma vale la relazione:

$$R_{xy}(\tau) = R_{yx}(-\tau)$$

Quando  $R_{xy}(\tau) = 0$ ,  $x(t)$  e  $y(t)$  sono dette non correlate; se invece risulta  $R_{xy}(\tau) = 0 \forall \tau$  allora la  $x(t)$  e  $y(t)$  si dicono statisticamente indipendenti [4].

### **A.6.2.3 FUNZIONE DENSITA' SPETTRALE DI POTENZA**

La funzione densità spettrale di potenza di un segnale aleatorio descrive la composizione in frequenza del segnale in termini di densità spettrale del suo valore quadratico medio [7]. Il valore quadratico medio di una funzione campione in un

intervallo di frequenza  $[f, f + \Delta f]$  può essere ottenuto filtrando il segnale con un filtro passa basso [4].

Questo valore quadratico medio tagliato sulle frequenze in esame è espresso come [4]:

$$\Psi_x^2(f, \Delta f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt \quad (28)$$

dove  $x(t, f, \Delta f)$  è la porzione di  $x(t)$  nell'intervallo di frequenza  $[f, f + \Delta f]$ .

Richiamando la formula (26), la funzione densità spettrale di potenza o power spectral density function (PSD) si definisce come [7]:

$$G_{xx}(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Psi_x^2(f, \Delta f)}{\Delta f} = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (29)$$

Dunque la  $G_{xx}(f)$  risulta essere la trasformata di Fourier della funzione autocorrelazione [7]:

$$G_{xx}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega \tau} d\tau \quad (\omega = 2\pi f)$$

Dalla parità della  $R_{xx}(\tau)$  si deduce che la sua trasformata di Fourier è una funzione reale e non negativa; di fatto può scriversi [7]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau = 2 \int_0^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau \quad (30)$$

$$G_{xx}(f) = 4 \int_0^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau \quad (31)$$

cioè, la funzione densità spettrale di frequenza è reale ed è pari a due volte la trasformata cosinusoidale della funzione di autocorrelazione in tutto il suo dominio di esistenza  $\tau \in [-\infty, +\infty]$  oppure a quattro volte la trasformata cosinusoidale della funzione di autocorrelazione nell'insieme dei ritardi non negativi  $\tau \in [0, +\infty]$ , [7].

Dunque la PSD fornisce le stesse informazioni, relative ad un processo aleatorio, date dalla funzione di autocorrelazione, però nel dominio delle frequenze [4].

La funzione  $G_{xx}(f)$  ha la seguente proprietà [7]:

---


$$\int_0^{+\infty} G_{xx}(f) df = \int_0^{+\infty} G_{xx}(\omega) d\omega = \Psi_x^2 = \sigma_x^2 + \mu_x^2 \quad (32)$$

ossia l'area sottesa alla curva definita dalla funzione  $G_{xx}(f)$  rappresenta il valore quadratico medio [7]. Da tale proprietà risultano immediate le seguenti relazioni [7]:

$$G_{xx}(f) \Delta f = \Psi_x^2(f)$$

$$G_{xx}(\omega) \Delta \omega = \Psi_x^2(\omega)$$

dove  $\Psi_x^2(f)$ , per  $\Delta f$  o  $\Delta \omega$  sufficientemente piccoli, rappresenta il valore quadratico medio associato alla sola generica frequenza  $f$ , cioè  $\Psi_x^2(f)$  rappresenta la quota parte di valore quadratico medio filtrato alla frequenza  $f$  di banda  $\Delta f$ , [7].

Con riferimento alle formule ( 29 ) e ( 31 ), il valore quadratico medio si può ricavare come [7]:

$$\Psi_x^2 = \int_0^{+\infty} G_{xx}(f) df$$

Tornando sulle proprietà della funzione densità spettrale di potenza, possiamo dire che la  $G_{xx}(\omega)$  è una funzione reale in quanto la [7]:

$$G_{xx}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

può essere sviluppata nel seguente modo [7]:

$$G_{xx}(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) (\cos(\omega\tau) - j \sin(\omega\tau)) d\tau$$

tendo conto della parità della funzione  $R_{xx}(\tau)$  e che la funzione seno è una funzione dispari, il contributo all'integrale relativo al seno si annulla per cui si ottiene la ( 31 ) che ci permette di affermare che, essendo la  $R_{xx}(\tau)$  reale, anche la  $G_{xx}(\omega)$  è una funzione reale [7].

La trasformata inversa della PSD è data da [7]:

$$R_{xx}(\tau) = \int_0^{+\infty} G_{xx}(f) e^{j2\pi f\tau} df = \int_0^{+\infty} G_{xx}(f) \cos(2\pi f\tau) df = \int_0^{+\infty} G_{xx}(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad (33)$$

Se la generica funzione  $x(t)$  è periodica, di essa si può definire lo spettro in cui la generica armonica è costante in modulo e fase; per una funzione  $x(t)$  aleatoria, la densità spettrale di potenza, pur essendo una grandezza reale, definisce solo il valore quadratico medio delle ampiezze delle singole armoniche perdendo di conseguenza ogni informazione relativa alle fasi [7].

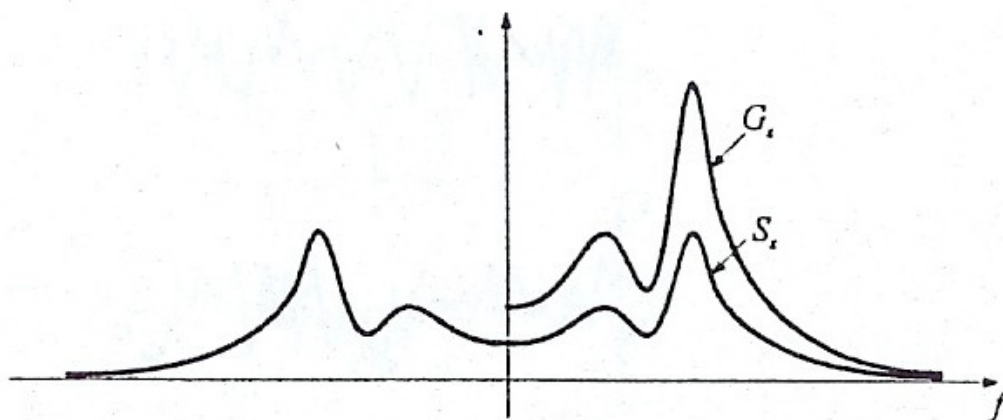
La funzione densità spettrale di potenza  $G_{xx}(f)$  trattata fin ora è definita nel dominio di frequenze  $[0, +\infty]$  ed è denominata one-sided spectral density function [4]. Si definisce invece two-sided spectral density function e si indica con  $S_{xx}(f)$ , la trasformata di Fourier della funzione autocorrelazione definita nel dominio di frequenze  $[-\infty, +\infty]$ , [4]:

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau$$

$$S_{xx}(f) = 2 \int_0^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau \quad (34)$$

Tale definizione non è incongruente con la (29), infatti la  $S_{xx}(f)$ , come trasformata di Fourier, è definita sia per  $f \geq 0$  che per  $f < 0$ , contrariamente alla  $G_{xx}(f)$  che esiste solo per  $f \geq 0$ . Stante la simmetria della funzione integranda, si ha [4]:

$$G_{xx}(f) = 2S_{xx}(f), \quad \forall f \geq 0$$



**Fig A.18** – One-sided e Two-sided spectral density

Con riferimento alla two-sided spectral density, la  $R_{xx}(\tau)$  come antitrasformata degli spettri si ottiene da [4]:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) e^{j2\pi f\tau} df = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{xx}(f) \cos(2\pi f\tau) df = \int_0^{+\infty} S_{xx}(f) \cos(2\pi f\tau) df$$

#### A.6.2.4 FUNZIONE CROSS-SPETTRO

La funzione cross- spettro è definita come la trasformata di Fourier della funzione crosscorrelazione [4]:

$$G_{xy}(f) = G_{yx}(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (35)$$

$$G_{xy}(f) = 2S_{xy}(f) \quad 0 \leq f < +\infty$$

Contrariamente alla funzione densità spettrale di potenza, il cross-spettro è una funzione complessa in quanto la  $R_{xy}(\tau)$  non è una funzione pari [4].

### A.7 DIGITALIZZAZIONE DEI SEGNALE

Un segnale  $x$  è funzione della variabile indipendente tempo  $t$ :  $x = x(t)$ .

La classificazione morfologica avviene sulla base delle caratteristiche [3] :

- 1) del dominio di definizione di  $t$
- 2) del codominio, cioè dell'insieme definito da  $x(t)$

Rispetto alle caratteristiche del dominio  $t$  i segnali possono distinguersi in segnali continui, funzioni del tempo definite nel dominio dei numeri reali, e segnali discreti, definiti nell'insieme dei numeri relativi  $[\dots -2T, -T, 0, T, 2T, \dots]$ , [3].

Con riferimento alle caratteristiche del codominio possiamo individuare [3]:

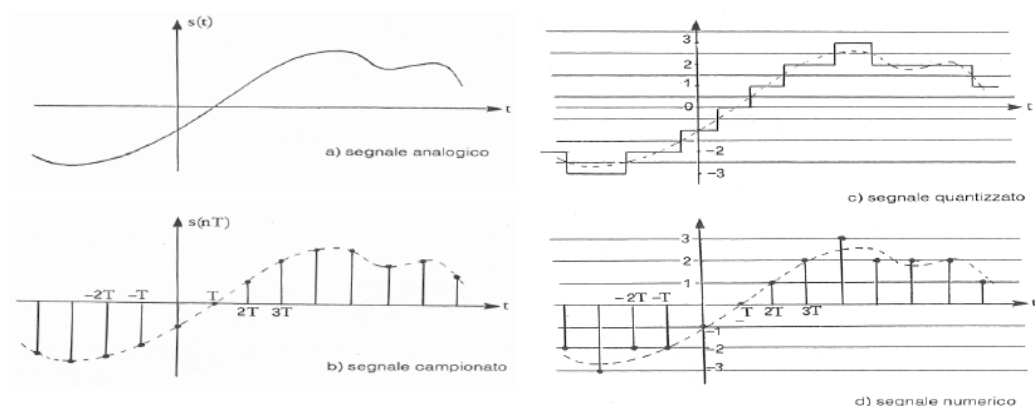
segnali ad ampiezza continua, che hanno come codominio l'insieme dei numeri reali e segnali ad ampiezza discreta (o quantizzata), che hanno come codominio un insieme finito oppure un insieme infinito numerabile.

Operazioni elementari sui segnali sono il campionamento, che consiste nell'estrarre da un segnale continuo i valori che esso assume ad intervalli regolari di tempo  $T$ , definito appunto tempo di campionamento, e la quantizzazione, che consta nell'approssimare l'ampiezza del segnale al più vicino tra un numero finito di livelli equispaziati [3].

## **Classificazione morfologica dei segnali**

Dal punto di vista morfologico i segnali si distinguono in [3]:

1. Segnali Analogici, hanno forma simile alla grandezza fisica rappresentata e sono ad ampiezza continua ed a tempo continuo.
2. Segnali Campionati, ottenuti tramite campionamento di segnali analogici ed hanno tempo discreto ed ampiezza continua.
3. Segnali Quantizzati, ottenuti per quantizzazione di segnali analogici e sono a tempo continuo ed ampiezza discreta.
4. Segnali Digitali o Numerici, ottenuti per campionamento e successiva quantizzazione dei segnali analogici. Questi ultimi hanno sia ampiezza che tempo discreti.



**Fig. A.19** – a) Segnale analogico-b) Segnale campionato-c) Segnale quantizzato-d) Segnale digitale

In generale i segnali sono analogici solo all'origine, per essere acquisiti e processati sono trasformati in segnali digitali; per cui entrano in gioco il periodo (o la frequenza) di campionamento e la discretizzazione del segnale [3].

I computer lavorano su numeri quindi il segnale deve essere rappresentato da una successione di dati espressi in forma numerica, dunque digitalizzare il segnale analogico vuol dire che, ad intervalli costanti di tempo (periodo di campionamento), si attribuisce al segnale un valore con un determinato numero di cifre decimali [3].

Il segnale digitale, è tanto più simile a quello analogico quanto più piccolo è il periodo di campionamento e quanto più grande è il numero di cifre decimali con cui si acquisisce il segnale [3].

### **Ricostruzione e prolungamento periodico dei segnali**

Il campionamento di un segnale può essere guardato come il prodotto tra il segnale continuo originale  $x(t)$  ed una serie di impulsi  $h_c(t)$  separati di una quantità pari all'intervallo di campionamento  $\Delta t$  [6]:

$$h_c(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - n\Delta t)$$

con  $\delta$  uguale alla funzione di Dirac:

$$\delta(k) = \{1 \text{ per } k = 0; 0 \text{ per } k \neq 0\}$$

Alla luce di quanto detto, il segnale campionato  $x_j$  sarà:

$$x_j = x(t_j)h_c(t_j)$$

$$x_j(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(t_j)h_c(t_j)$$

Se sussistono alcune ipotesi, è possibile ricostruire esattamente il segnale continuo  $x(t)$  a partire dalla sequenza dei suoi campioni  $x_j(t)$ , [7].

Rievocando il teorema della convoluzione, la trasformata di Fourier del segnale campionato  $x_j$ , prodotto dalle funzioni  $x(t)$  e  $h_c(t)$ , sarà pari alla convoluzione tra la trasformata di Fourier del segnale continuo  $X(f)$  e quella della funzione di campionamento  $H_c(f)$ , [6] :

$$F[x_j] = F[x(t_j)h_c(t_j)] = X(f) * H_c(f) \quad (40)$$

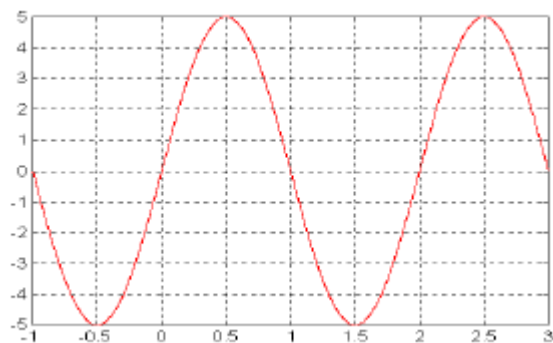
La trasformata di Fourier di una sequenza di impulsi intervallati di  $\Delta t$  è un'altra sequenza di impulsi intervallati di  $\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$ , la quale risulta essere la frequenza di campionamento  $f_c$  [6]:

$$H_c(f) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - \frac{n}{\Delta t}\right) = \Delta f \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - n\Delta f) = f_c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(f - nf_c)$$

Dunque la convoluzione risulterà pari alla trasformata  $X(f)$  prolungata periodicamente ad intervalli di frequenza pari a  $\Delta f = \frac{1}{\Delta t} = f_c$ , [6].

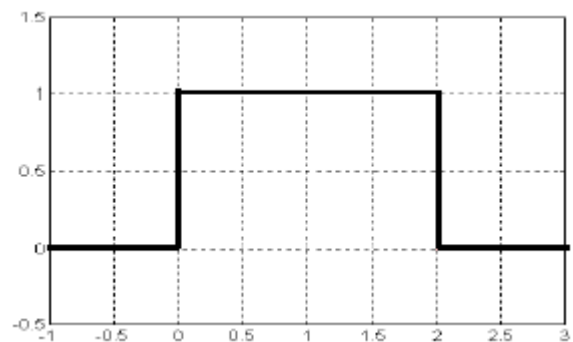
Occorrerà quindi fissare la finestra temporale o tempo dell'acquisizione, cioè il tempo durante il quale si osserverà il segnale; la frequenza o il periodo di campionamento ed il numero di cifre decimali necessarie a descrivere il segnale [3].

Preso, ad esempio, un segnale analogico di tipo sinusoidale che rappresenta la  $x(t)$  [3]:



**Fig. A.20** – Segnale sinusoidale rappresentante il segnale originale continuo

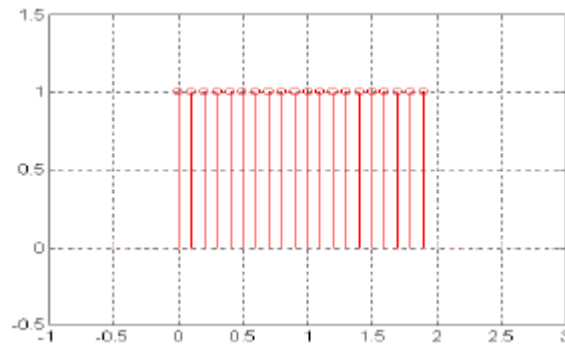
esso viene osservato nell'intervallo di tempo tra 0 e 2 secondi, che rappresenta quindi la finestra temporale:



**Fig. A.21** – Finestra temporale prescelta

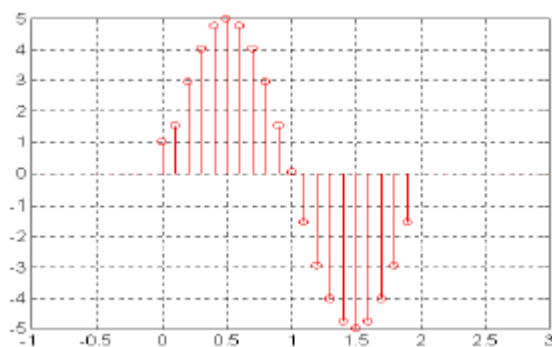
Il segnale viene acquisito solo all'interno della finestra temporale ed ad intervalli di tempo regolari, realizzando così di fatto la nostra funzione  $h_c(t)$  [3]:





**Fig. A.22** – Acquisizione del segnale all'interno della finestra temporale

Applicando il teorema della convoluzione si ottiene il segnale campionato [3]:



**Fig. A.23** – Segnale Campionato

Da quanto detto fin ora sul campionamento, e da quanto verrà più dettagliatamente espresso in seguito, discende il [4]: Teorema del Campionamento: se il segnale originale  $x(t)$  è definito in  $[-\infty; +\infty]$ , se esso è a banda limitata cioè se  $|f| < f_b$  e se la sua trasformata di Fourier  $X(f)$  esiste, allora se risulta essere soddisfatta la condizione di Nyquist  $f_c \geq 2f_b$  è possibile ricostruire in maniera univoca la  $x(t)$  a partire dalla sua versione campionata  $x_j(t)$  (Fig 1.24). Se invece il segnale non è a banda limitata o se, pur essendolo, la condizione di Nyquist non è verificata, allora le repliche di  $X(f)$  si sovrappongono e quindi la ricostruzione senza errori non è più possibile: si dice allora che il segnale campionato è affetto da aliasing.

Questo aspetto verrà maggiormente approfondito in un successivo paragrafo.

---

## **A.7.1 CONTENUTO IN FREQUENZA DI UN SEGNALE DIGITALE**

Ai segnali digitali non è possibile applicare né la Serie né la Trasformata di Fourier; si può applicare unicamente la Trasformata Discreta di Fourier. Perde anche significato la distinzione tra periodici e transitori in quanto il segnale digitale è definito solo all'interno della finestra di osservazione [3].

I diagrammi in termini di modulo e fase della Trasformata Discreta di Fourier costituiscono il contenuto in frequenza del segnale digitale che, a meno dei problemi che verranno in seguito analizzati, dovrebbe essere rappresentativo del segnale analogico originario (digitalizzato per consentirne la memorizzazione e l'analisi) [3].

La Trasformata Discreta di Fourier è una funzione digitale nel dominio della frequenza caratterizzata da triplette di numeri rappresentati le frequenze (o pulsazioni, regolarmente intervallate tra zero e la frequenza di Nyquist –metà della frequenza di campionamento), i moduli e le fasi delle componenti spettrali [3].

Poiché la DFT è una funzione digitale, i grafici dovrebbero essere in teoria costituiti da un insieme di punti, anche se si preferisce di solito rappresentare i diagrammi come una linea spezzata che li congiunge [3].

A punti nell'intervallo  $[0; N/2]$  corrispondono le frequenze da 0 alla frequenza di Nyquist  $1/(2\Delta t)$ , [3].

A punti nell'intervallo  $[N/2; N]$  corrispondono le frequenze negative [3].

Se si valutano punti esterni all'intervallo  $[0; N-1]$  si riscontra la proprietà di periodicità della DFT, [3].

### **A.7.1.1 TRASFORMATA DISCRETA DI FOURIER**

La definizione analitica della trasformata di Fourier, così come fornita in precedenza, non sempre conduce a dei risultati, poiché non sempre l'integrale è calcolabile [3].

Inoltre, nelle applicazioni pratiche, la funzione originaria è fornita con un campionamento. Si procede quindi ad integrazione della Trasformata di Fourier, ottenendo così la trasformata discreta di Fourier (DFT), essa opera su sequenze di valori discreti, equispaziati in un intervallo finito [3].

---

## **Metodo della Fast Fourier Transform**

L'algoritmo maggiormente adoperato per determinare l'espressione analitica della trasformata discreta di Fourier è la trasformata rapida di Fourier (FFT), [4].

La trasformata di Fourier di un qualsiasi segnale  $x(t)$  è espressa dal seguente integrale complesso definito in  $[-\infty, +\infty]$ , [4] :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

Come detto in precedenza, questa  $X(f)$  non esiste per una qualsiasi  $x(t)$  rappresentativa di un processo aleatorio quando si usano limiti infiniti.

Restringendo i limiti d'integrazione ad un intervallo finito di tempo  $[0, T]$ , la trasformata di Fourier della  $x(t)$  esisterà e sarà data da [4]:

$$X(f, T) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (36)$$

Ora, consideriamo la  $x(t)$  campionata in  $N$  punti equamente spaziat e posti a distanza  $h = \Delta t$ ; quindi la trasformata può essere calcolata da una funzione del tempo usando  $N$  campioni presi ai tempi [3]:

$$t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, (N-1)\Delta t$$

in cui  $\Delta t$  è l'intervallo temporale di campionamento.

$$x(t) = x(nh) = x(n\Delta t) \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$T = N\Delta t$$

All'arbitraria frequenza  $f$ , la versione discreta della trasformata di Fourier è data da:

$$X(f, T) = h \sum_{n=0}^{N-1} x(nh) e^{-j2\pi fnh} \quad (37)$$

Usualmente, le frequenze discrete alle quali computare la  $X(f, T)$  sono [4]:

$$f_k = kf = \frac{k}{T} = \frac{k}{Nh} \quad \text{con } k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

A queste frequenze, i valori della trasformata sono [4]:

$$X(k) = \frac{X(f_k, T)}{h} = \sum_{n=0}^{N-1} x(nh) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (38)$$

Non a tutti i punti della DFT corrispondono frequenze presenti nel segnale originale;

---

$N/2$  valori trovati con la DFT si ottengono dai precedenti  $N/2$ , questi quindi non corrispondono ad un reale contenuto in frequenza del segnale originario [4].

Analogamente è possibile ottenere la trasformata inversa discreta [3]:

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (39)$$

La DFT è periodica con periodo  $N$  pari al numero di campioni acquisiti nel dominio del tempo, il suo calcolo può essere ulteriormente velocizzato, se il numero di campioni è una potenza di 2, con l'introduzione di un procedimento che riduce il numero delle operazioni da  $N^2$  a  $N \log_2 2$  [4].

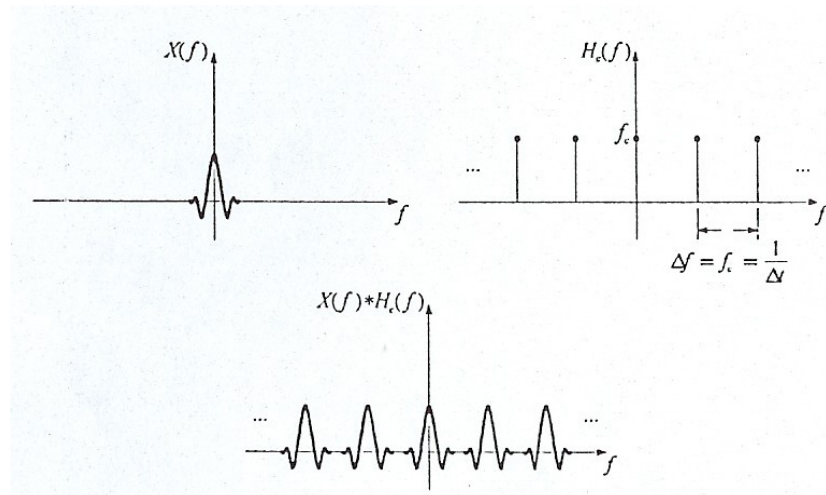
Il procedimento sviluppato da Cooley e Tukey è denominato Fast Fourier Transform (FFT) e fornisce valori approssimati della trasformata di Fourier [4]; tale approssimazione è tanto minore quanto minore è l'intervallo di campionamento e quanto maggiore è la durata del segnale [4].

## **A.7.2 PROBLEMATICHE DI TRATTAZIONE DEI SEGNALE DIGITALI**

### **Aliasing**

Supponiamo che il segnale campionato sia a banda limitata del tipo  $|f| < f_b$ , cioè il campionamento sia effettuato raccogliendo solo le frequenze interne all'intervallo  $[-f_b; f_b]$ , e con intervallo di campionamento  $\Delta t$  [6].

In tal caso, come evidenziato nella figura sottostante, la trasformata di Fourier del segnale sarà valida solo nell'intervallo di frequenze suddetto e la trasformata di Fourier del segnale campionato è costituita dal prolungamento periodico della trasformata del segnale originale, con periodicità pari alla frequenza di campionamento  $f_c$ , [6]:



**Fig. A.24** – Trasformata di Fourier di un segnale campionato a banda limitata

Dunque, se risulta

$$2f_b \leq f_c$$

i diagrammi della trasformata  $X(f)$  prolungata periodicamente non si sovrappongono nella convoluzione e il lobo centrale non è distorto [6].

Da quanto detto discendono i seguenti teoremi [6]:

1. Teorema di Nyquist: fissata la frequenza di campionamento  $f_c$ , la più alta frequenza che fornisce informazioni non distorte è pari a :

$$f_N = \frac{f_c}{2} \quad (41)$$

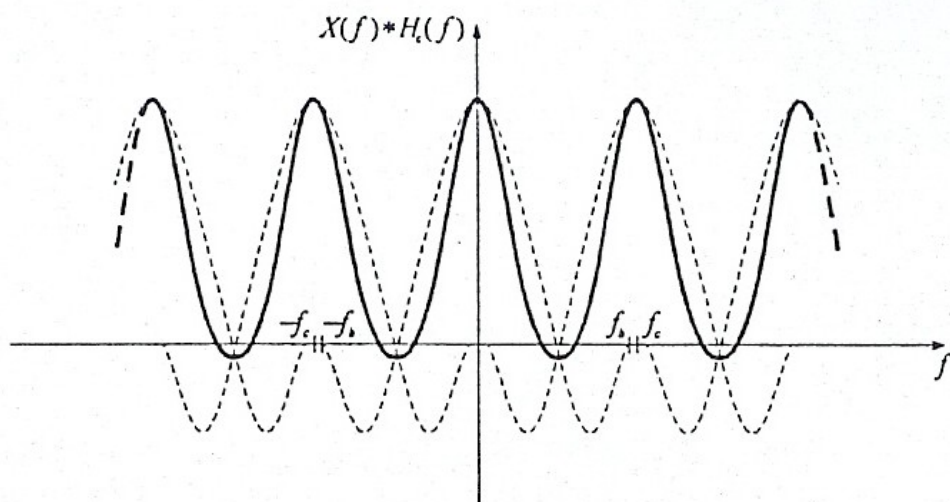
dove  $f_N$  è detta appunto frequenza di Nyquist

2. Teorema di Shannon : fissata la frequenza di banda  $f_b$ , la più bassa frequenza di campionamento  $f_c$  da utilizzare per ottenere informazioni non distorte fino a  $f_b$ , è pari a:

$$f_s = 2f_b \quad (42)$$

Occorre quindi campionare a frequenza almeno doppia della più alta frequenza contenuta nel segnale originale [3].

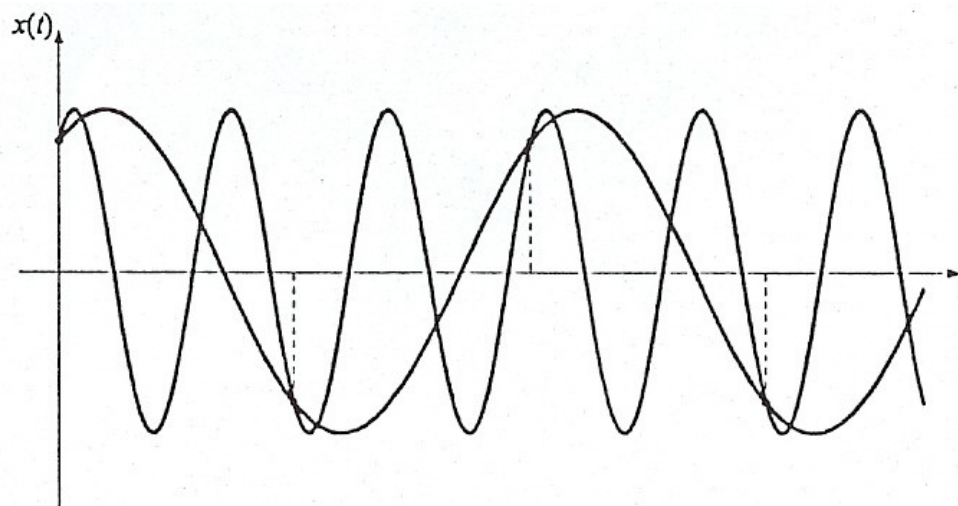
Se la frequenza di campionamento diminuisce fino a diventare minore di  $f_s$  i vari lobi si sovrappongono ed il lobo centrale si distorce, come evidenziato dalla figura sottostante [6]:



**Fig. A.25** – Fenomeno di aliasing nel dominio delle frequenze

Questo fenomeno va sotto il nome di aliasing nel dominio delle frequenze.

Nel dominio del tempo l'aliasing fornisce onde a varie frequenze che passano per gli stessi punti campionati. Tale problema è espresso dal grafico seguente [6]:



**Fig. A.26** – Fenomeno di aliasing nel dominio del tempo

Per ovviare al problema dell'aliasing ,eliminando a monte le alte frequenze che non potrebbero comunque essere individuate, occorre filtrare il segnale analogico prima dell'acquisizione, in modo da tagliare tutte le componenti a frequenze superiori a quella di Nyquist [3].

E' necessario quindi adottare dei filtri anti-aliasing, ovvero filtri passa-basso.

## **Leakage**

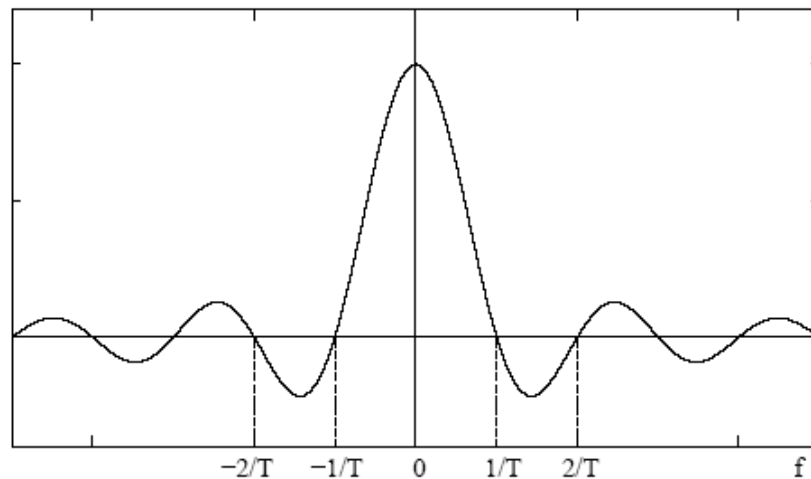
Il campionamento di un segnale  $x(t)$  non può essere indefinito nel tempo, ma, detta  $T$  la durata del campionamento, il segnale campionato può ottenersi come prodotto del segnale originario continuo e di una finestra rettangolare  $h_R(t)$  nel dominio del tempo e durata  $T$  [6]:

$$h_R(t) = \begin{cases} 1 & \text{per } |t| \leq T/2 \\ 0 & \text{per } |t| > T/2 \end{cases}$$

La cui trasformata di Fourier è espressa come [6]:

$$H_R(f) = \frac{\text{sen}(\pi f T)}{\pi f}$$

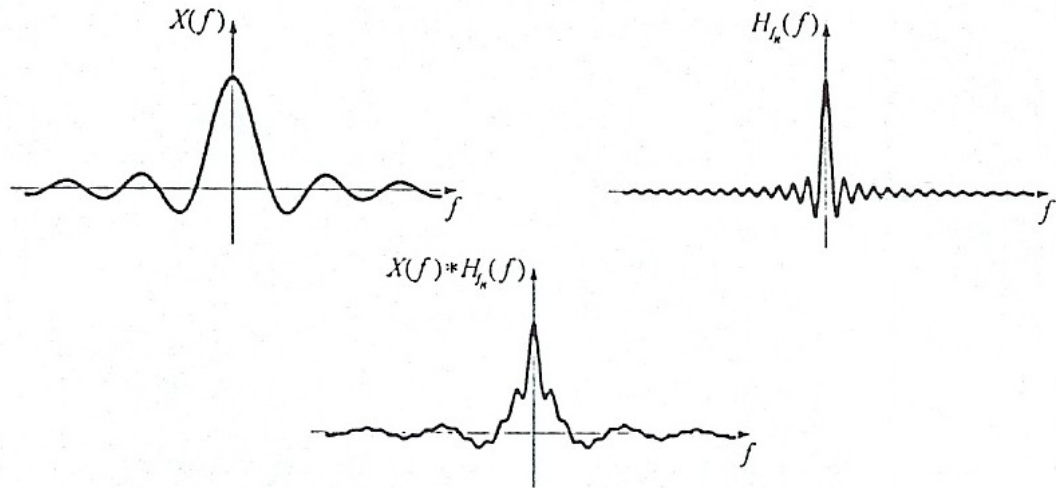
ed il cui grafico è [6]:



**Fig. A.27** – Trasformata di Fourier di una finestra rettangolare di durata  $T$

esso consiste in un lobo centrale di larghezza  $\frac{2}{T}$  ed infiniti lobi laterali di larghezza  $\frac{1}{T}$ ; l'altezza del lobo centrale è pari a  $T$ , mentre i lobi laterali decrescono in altezza come  $|f|^{-1}$ .

La convoluzione tra  $X(f)$  e la  $H_{JR}(f)$  induce quindi una distorsione alla  $X(f)$ , come mostrato nella figura di sotto [6]:



**Fig. A.28** – Distorsione della trasformata di Fourier  $X(f)$  per il fenomeno del leakage

Questa lenta diminuzione delle altezze dei lobi laterali della finestra rettangolare può essere inaccettabile [6].

Per ovviare al problema del Leakage, è necessario adottare finestre temporali tali da attenuare la parte iniziale e finale dell'acquisizione temporale [3].

Una diminuzione più rapida con la frequenza si ottiene utilizzando la finestra di Hanning [6]:

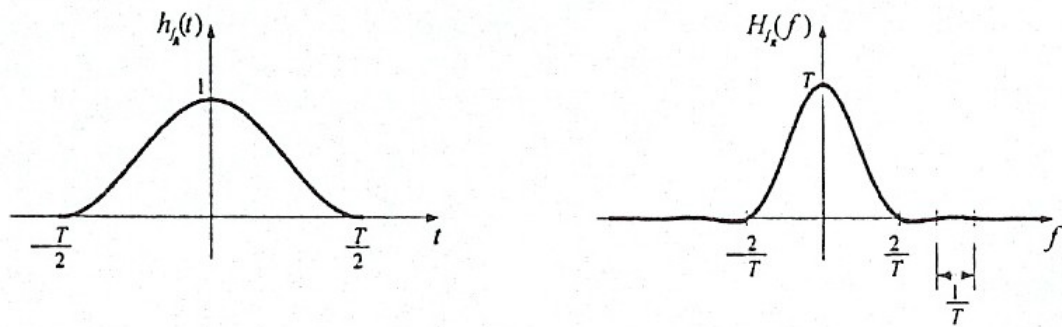
$$h_{fH}(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad t \in \left[ -\frac{T}{2}; \frac{T}{2} \right]$$

la cui trasformata è [6]:

$$H_{fH}(f) = \frac{1}{2} H_{JR}(f) + \frac{1}{4} H_{JR}\left(f - \frac{1}{T}\right) + \frac{1}{4} H_{JR}\left(f + \frac{1}{T}\right)$$

Le funzioni  $h_{fH}(f)$  e  $H_{fH}(f)$  sono riportate nel seguente grafico [6]:



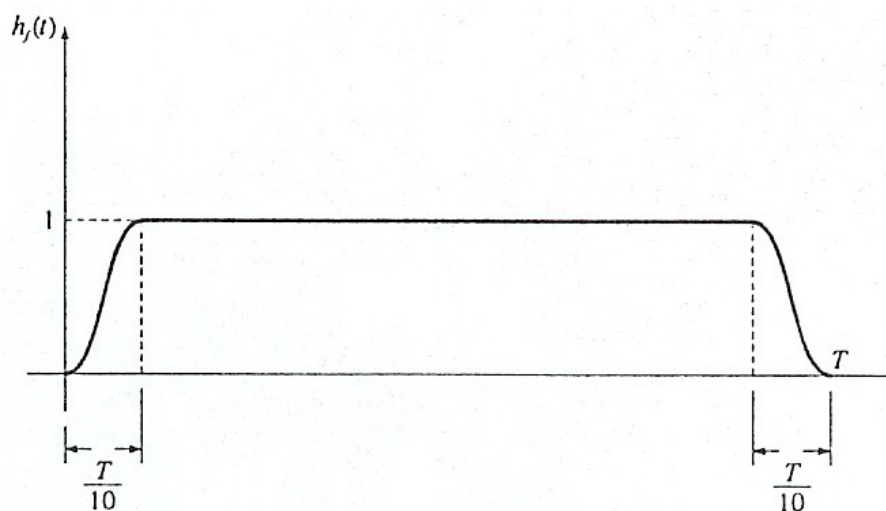


**Fig. A.29** – Finestra di Hanning

I lobi laterali della finestra di Hanning cadono come  $|f|^{-3}$ , ma la larghezza del lobo centrale è due volte quella della finestra rettangolare, con conseguente perdita di risoluzione [6].

In generale, una finestra temporale dovrebbe soddisfare alcuni requisiti in contrasto tra loro: essere il più possibile costante all'interno dell'intervallo di campionamento, smussare quanto più le variazioni nel dominio del tempo al fine di ridurre i lobi laterali nel dominio della frequenza, nel dominio della frequenza concentrare il più possibile il lobo principale intorno ad  $f=0$ , [6].

Un buon compromesso si raggiunge con la finestra rettangolare a smussi cosinusoidali mostrata nella figura sottostante, rappresentata da una finestra di valore costante nella parte centrale e smussi cosinusoidali nelle parti terminali. La larghezza degli smussi è il 10% della durata complessiva del campionamento [4]:



**Fig. A.30** – Finestra rettangolare con smussi cosinusoidali

---

## **APPENDICE B**

### ***TABELLE CON LA TIPOLOGIA DI PAVIMENTAZIONE SUDDIVISE PER QUARTIERE***

---

**Quartiere Pendino.**

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via Saverio Baldacchini	Basoli
Via Campagnari	Basoli
Via T. Campanella	Flessibile
Via Arnaldo Cantina	Basoli
Via Ernesto Capocci	Basoli
Via Carminiello Ai Mannesi	Basoli
Via Carminiello Al Mercato	Basoli
Via Antonio Ciccone	Basoli
Via Pietro Colletta	Sanpietrini
Via Del Grande Archivio	Basoli
Via Guido Dorso	Basoli
Via Duca Di S. Donato	Basoli
Via Duomo	Sanpietrini
Via Egiziaca A Forcella	Basoli
Via Marramarra	Basoli
Via Miroballo Al Pendino	Basoli
Via Nolona	Basoli
Via Giovanni Paladino	Basoli
Via Ferdinando Palasciano	Sanpietrini
Via Francesca Pignatelli	Sanpietrini
Via S. Arcangelo A Baiano	Basoli
Via Seggio Del Popolo	Basoli
Via S. Giovanni Corte	Basoli
Via Padre Francesco Desta	Basoli
Via Padre Luigi Tosti	Basoli
Via Renovella	Basoli
Via Silvio Spaventa	Basoli
Via Antonio Tari	Basoli
Via Vicaria Vecchia	Basoli
Corso Giuseppe Garibaldi	Basoli/Asfalto
Corso Umberto I	Sanpietrini
Vico Barrettari	Basoli
Vico Dei Panettieri	Basoli
Vico Ii Carminiello Ai Mannesi	Basoli
Vico Grande	Basoli

---

Vico Monte Della Pietà	Basoli
Vico Nuovo Ai Librai	Basoli
Vico Pappardelle Al Pendino	Basoli
Vico S. Guido	Basoli
Vico San Severino	Basoli
Piazza Crocelle Ai Mannesi	Sanpietrini
Piazzetta Divino Amore	Sanpietrini
Piazza Nicola Amore	Flessibile

**Quartieri Avvocata, Montecalvario, S. Giuseppe, Porto.**

Denominazione	Tipologia
Via S. Aspreno	Basoli
Via Avvocata	Basoli
Via Caronale Guglielmo Sanfelice	Sanpietrini
Via Francesco Saverio Carrera	Sanpietrini
Via Domenico Capitelli	Basoli
Via Giulio Cesare Cortese	Basoli
Via Cisterna Dell'olio	Sanpietrini
Via Conte Olivares	Basoli
Via Cristoforo Colombo	Sanpietrini/Asfalto/Basoli
Via Benedetto Croce	Basoli/Sanpietrini
Via D'andrea	Basoli
Via Dei Fiorentini	Sanpietrini
Via Dei Pellegrini	Basoli
Via Dell'incoronata	Sanpietrini
Via Del Maio Di Porto	Basoli
Via Armando Diaz	Sanpietrini
Via Angelo Di Costanzo	Basoli
Via Lanzieri	Basoli
Via Maddaloni	Basoli
Via Marchese Campodisola	Sanpietrini
Via Giuseppe Marotta	Basoli
Via Medina	Flessibile
Via Guglielmo Melisurgo	Flessibile
Via Mezzocannone	Basoli
Via Monteoliveto	Sanpietrini
Via Luigi Palmieri	Basoli

---

Via Giuseppe Pisanelli	Sanpietrini
Via Porta Di Massa	Basoli
Via S. Anna Dei Lombardi	Sanpietrini/Asfalto
Via Santa Brigida	Sanpietrini
Via Santa Chiara	Basoli
Via S. Carlo	Asfalto/Sanpietrini
Via S. Giovanni Maggiore Pignatelli	Basoli
Via S. Nicola Alla Dogana	Basoli
Via S. Sebastiano	Basoli
Via Tarsia	Basoli
Via Toledo	Sanpietrini
Via Traversa Leone	Flessibile
Via Giuseppe Verdi	Flessibile
Via Vittorio Emanuele II	Flessibile
Via Raffaele Viviani	Basoli
Vico Bagnara	Basoli
Vico Camestrari	Basoli
Vico Carcere San Felice	Basoli
Vico Dei Banchi Dello Spirito Santo	Basoli
Vico Dei Costanzi	Basoli
Vico Della Quercia	Basoli
Vico Donnaromita	Basoli
Vico Mastellone	Basoli
Vico Medina	Basoli
Vico S. Geronimo	Basoli
Vico Santa Maria La Nova	Basoli
Via S. Tommaso D'aquina	Flessibile
Piazza Giovanni Bovio	Sanpietrini
Piazza Carolina	Sanpietrini
Piazza Dante	Sanpietrini
Piazza Del Plebiscito	Basoli/Sanpietrini
Piazza Gesù Nuovo	Sanpietrini
Piazza Municipio	Flessibile
Piazza S. Domenico Maggiore	Basoli
Piazza 7 Settembre	Sanpietrini
Piazza Trieste E Trento	Sanpietrini
Piazzetta Di Porto	Sanpietrini

---

**Quartieri Chiaia, S. Ferdinando, Posillipo.**

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via Ferdinando Acton	Asfalto/Sanpietrini
Via Amendola	Flessibile
Via Giordano Bruno	Flessibile
Via T. Campanella	Flessibile
Via Caracciolo	Flessibile
Via Chiaia	Sanpietrini/Asfalto
Via Vittoria Colonna	Sanpietrini
Via Calabritto	Basoli
Via Carducci	Sanpietrini
Via C. Console	Sanpietrini
Via Francesco Crispi	Sanpietrini
Via V. Cuoco	Flessibile
Via Michelangelo De Caravaggio	Flessibile
Via Dei Mille	Sanpietrini
Via Domenico Morelli	Sanpietrini/Asfalto
Via Falero	Sanpietrini
Via Fratelli Magnani	Basoli
Via Del Parco Margherita	Sanpietrini
Via Tito Livio	Sanpietrini
Via Alessandro Manzoni	Flessibile
Via Marechiaro	Flessibile
Via G. Martucci	Basoli
Via Mergellina	Flessibile
Via Marina	Sanpietrini/Asfalto
Via Nuova Marina	Sanpietrini/Asfalto
Via Orazio	Flessibile
Via Ferdinando Palasciano	Sanpietrini
Via Partenope	Flessibile
Via G. Pergolesi	Flessibile
Via Petrarca	Flessibile
Via Francesco Pignatelli	Sanpietrini
Via Carlo Poerio	Sanpietrini
Via Posillipo	Flessibile/Sanpietrini
Via Nicola Ricciardi	Flessibile
Via Riviera Di Chiaia	Sanpietrini/Asfalto
Via Russo	Sanpietrini

---

Via Santo Strato	Sanpietrini
Via S. Lucia	Sanpietrini
Via S. Maria In Portico	Basoli
Via S. Pasquale	Basoli
Via S. Pasquale A Chiaia	Sanpietrini
Via T. Tasso	Sanpietrini
Via Achille Torelli	Flessibile
Corso Europa	Flessibile
Piazza Amedeo	Sanpietrini
Piazza Salvatore Di Giacomo	Sanpietrini
Piazza Sannazzaro	Flessibile
Piazza S. Luigi	Flessibile
Piazza San Pasquale	Sanpietrini
Piazza Vittoria	Flessibile
Vico Satriano	Basoli
Vico S. Guido	Basoli
Vico Ischitella	Basoli
Vico S. Maria In Portico	Basoli
Vico S. Rocco	Basoli
Largo Vasto A Chiaia	Basoli
Largo Sermoneta	Basoli
Viale Antonio Gramsci	Flessibile
Discesa Coroglio	Flessibile
Corso Europa	Flessibile
Corso Vittorio Emanuele	Flessibile

**Quartieri S. Lorenzo, Vicaria.**

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via Aquila	Flessibile
Via Arenaccia	Flessibile
Via Bari	Flessibile
Via Ettore Bellini	Flessibile
Via Tommaso Giovanni Blanch	Flessibile
Via Broggia	Sanpietrini

---

Via Benedetto Cairoli	Basoli
Via Campania	Sanpietrini
Via Tristano Caracciolo	Basoli
Via Geronimo Carafa	Flessibile
Via Carbonara	Sanpietrini
Via Carriera Grande	Basoli
Via Casanova	Basoli/Asfalto
Via Ignazio Ciaia	Sanpietrini
Via Colonnello Gabriele Pepe	Flessibile
Via Alfonso D'aragona	Basoli
Via Alfonso D'avalosi	Flessibile
Via Della Bolla	Basoli
Via Della Polveriera	Flessibile
Via Domenico Cirillo	Sanpietrini
Via Donnaregina	Basoli
Via Carlo De Vincentiis	Basoli
Via Dei Tribunali	Basoli/Sanpietrini
Via Del Duomo	Sanpietrini
Via Della Sapienza	Basoli/Sanpietrini
Via Del Sole	Basoli
Via Del Vasto A Capuani	Basoli
Via Ferrara	Flessibile
Via Firenze	Sanpietrini
Via Foria	Sanpietrini
Via Francesco Saverio	Basoli
Via Generale Piamell	Flessibile
Via Generale Francesco Pignatelli	Flessibile



---

Via Genova	Flessibile
Via Giannone	Basoli
Via Nilo	Basoli
Via Fossi A Pontenuovo	Basoli
Via Luigi La Vista	Flessibile
Via Maria Longo	Sanpietrini
Via Giambattista Lorenzi	Basoli
Via Martiri D'otrantò	Basoli
Via Mazzocchi	Basoli
Via Nazionale	Basoli
Via Nuova Poggioreale	Basoli
Via Palermo	Flessibile
Via Parma	Flessibile
Via Pavia	Flessibile
Via Federico Persico	Flessibile
Via Enrico Pessina	Sanpietrini
Via Pisa	Flessibile
Via Alessandro Poero	Sanpietrini
Via Porta S. Gennaro	Basoli
Via Porzio	Basoli
Via Rimini	Flessibile
Via Rocco	Basoli
Via S. Antonio Pasquale	Sanpietrini
Via S. Biagio Dei Librai	Sanpietrini
Via S. Sofia	Basoli
Via Cesare Rosaroll	Basoli
Via Luigi Settembrini	Basoli

---

Via Francesco Saverio Siniscalca	Basoli
Via S. Gregorio Armeno	Basoli
Via S. Maria Di Costantinopoli	Sanpietrini
Via Torino	Flessibile
Via Venezia	Flessibile
Corso Garibaldi	Basoli/Asfalto
Corso Meridionale	Sanpietrini
Corso Novara	Flessibile
Vicoletto Lepri	Scale Di Basoli
Vico Vii Duchessa	Sanpietrini
Vico X Duchessa	Sanpietrini
Vico Dei Candelari	Basoli
Vico Dei Maiorani	Basoli
Vico Del Fico Al Purgatorio	Basoli
Vico Della Botte	Basoli
Vico Delle Foglie A Carbonara	Basoli
Vico Ferrovia	Flessibile
Vico Luigi De Crecchio	Sanpietrini/Basoli
Vico Lungo S. Antonio Abate	Basoli
Vico Mattonelle	Basoli
Vico S. Caterina A Formiello	Basoli
Vico S. Elmo	Basoli
Vico S. Filippo E Giacomo	Basoli
Vico San Nicola A Nilo	Basoli
Vico Santa Luciella	Basoli
Vico S. Aniello A Costantinopoli	Sanpietrini
Vico Tutti I Santi	Basoli

---

Vicoletto Carbonara	Basoli
Salita Ponte Nuovo	Basoli
Piazza Capuana	Sanpietrini
Piazza Carlo Iii	Sanpietrini
Piazza Enrico De Nicola	Sanpietrini
Piazza Leone	Basoli
Piazza S. Francesco Di Paola	Basoli
Piazza Principe Umberto	Basoli
Piazza Museo Nazionale	Sanpietrini
Calata Ponte Di Casanova	Basoli/Asfalto

#### **Quartiere Arenella.**

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via Abate	Flessibile
Via Arenella	Basoli
Via Teodoro Capocci	Flessibile
Via Conca	Flessibile
Via Edgardo Cortese	Flessibile
Via Tino Di Caimano	Flessibile
Via Vincenzo D'annibale	Sanpietrini
Via Mario Fiore	Flessibile
Via Giotto	Flessibile
Via Niccolò Iomelli	Flessibile
Via Marino E Gotronei	Flessibile
Via Simone Martini	Flessibile
Via Menzinger	Flessibile
Via Giacomo Merlani	Flessibile

---

Via Niutta	Flessibile
Via Ugo Nutta	Flessibile
Via Ugo Palermo	Flessibile
Via Platania	Sanpietrini
Via Porpora	Flessibile
Via Giuseppe Recco	Flessibile
Via Ruoppolo	Flessibile
Via Santacroce	Sanpietrini
Via Solario	Flessibile
Via Raffaele Stasi	Flessibile
Via Tarantino	Flessibile
Via Verdinois	Flessibile
Piazza Degli Artisti	Flessibile
Piazza Dell'immacolata	Flessibile
Piazza Medaglie D'oro	Flessibile
Salita Arenella	Basoli
Traversa Annunziata	Flessibile

---

**Quartieri Stella, S. Carlo all'Arena.**

<b>Denominazione</b>	<b>Tipologia</b>
Via Alfano	Basoli
Via Arena Della Sanità	Sanpietrini
Via Cagnazzi	Sanpietrini
Via Filippo Cavolino	Flessibile
Via Celentano	Basoli
Via Cristallini	Basoli
Via Crocelle A Porta S. Gennaro	Sanpietrini/Basoli
Via Dei Vergini	Sanpietrini
Via Della Sanità	Basoli
Via Federico Del Pino	Basoli
Via Carlo De Marco	Flessibile
Via V. De Sica	Basoli
Via Fonseca	Basoli
Via Foria	Sanpietrini
Via Michele Guadagno	Flessibile
Via Giovanni Gussone	Sanpietrini
Via Martin Luther King	Flessibile
Via Francesco Mastriano	Basoli
Via Materdei	Basoli
Via Miracoli	Basoli
Via Monte Silvano	Basoli
Via Nunziatella Ai Miracoli	Basoli
Via Enrico Pessina	Sanpietrini
Via Giuseppe Piazza	Basoli
Via G. Profumo	Flessibile

---

Via Salvatore Rosa	Flessibile
Via Marco Aurelio Severino	Flessibile
Via S. Eramo Vecchio	Basoli
Via S. Gennaro Dei Poveri	Basoli
Via S. Margherita A Fonseca	Basoli
Via S. Nigrando	Basoli
Via Stella	Basoli
Via S. Teresa Degle Scalzi	Sanpietrini
Via Tanucci	Basoli
Via Michele Tenore	Basoli
Via Vergini	Basoli
Via Antonio Villari	Basoli
Calata Capodichino	Sanpietrini
Vico Avallone	Basoli
Vico Buongiorno	Sanpietrini
Vico Canale	Basoli
Vico Carlotta	Scale Di Basoli
Vico Castellina	Basoli
Vico Cimitile	Basoli
Vico Croce Ai Miracoli	Basoli
Vico Dei Venti	Basoli
Vico Della Calce	Basoli
Vico Della Neve	Basoli
Vico Delle Pigne	Basoli
Vico Fonseca	Scale Di Basoli
Vico Largo S. Agostino Degli Salzi	Basoli
Vico Miracoli	Basoli

---

Vico Pacella Ai Miracoli	Basoli
Vico S. Eramo Vecchio	Basoli
Vico San Felice	Basoli
Vico S. Margherita	Basoli
Vico S. Maria Della Purità	Basoli
Vico S. Maria Degli Angeli Alle Croci	Basoli
Vico S. Maria Del Pozzo	Basoli
Vico S. Vincenzo	Basoli
Vico Tessotori	Basoli
Vico I° Rosariello Alle Pigne	Basoli
Vicoletto Della Pacella	Basoli
Vicoletto S. Marco A Miradois	Basoli
Vicoletto Tavernola	Basoli
Salita Dei Principi	Sanpietrini
Salita Della Riccia	Scale Di Basoli
Salita Miradois	Basoli
Salita Ritiro Della Purità	Scale Di Basoli
Salita San Raffaele	Basoli
Largo Dei Miracoli	Basoli
Largo Nando Conti	Basoli
Piazza Ottocolli	Basoli
Piazza Mario Pagano	Basoli
Piazza S. Eramo Vecchio	Basoli
Piazza Giambattista Vico	Flessibile
Cupa Eterno Padre	Basoli
Piazzetta Della Stella	Basoli

---

Traversa Stella	Basoli
Corso Amedeo Di Savoia Duca D'aosta	Flessibile

### Quartiere Vomero.

Denominazione	Tipologia
Via Antignano	Basoli
Via Enrico Alvino	Flessibile
Via Tito Augelini	Sanpietrini
Via Belvedere	Flessibile
Via Gianlorenzo Bernini	Sanpietrini
Via G. Bonito	Flessibile
Via A. Caccavello	Asfalto/Sanpietrini
Via Calata S. Francesco	Basoli
Via Luigi Caldieri	Flessibile
Via Cannello Di Ferro	Basoli/Asfalto
Via Carelli	Flessibile
Via Cesi	Flessibile
Via Filippo Cifarello	Basoli
Via Francesco Cilea	Asfalto/Sanpietrini
Via Domenico Cimarosa	Asfalto/Sanpietrini
Via M. Colantonio	Flessibile
Via B. Corenzio	Flessibile
Via G. Cortese	Flessibile
Via G. Cotronei	Flessibile
Via E. Dalbono	Flessibile
Via G. D'ayala	Flessibile



---

Via Andrea Da Salerno	Flessibile
Via G. D. D'auria	Sanpietrini
Via M. De Ciccio	Flessibile
Via F. De Mura	Flessibile
Via C. De Nardis	Sanpietrini
Via A. Di Massimo	Flessibile
Via G. Donizzetti	Flessibile
Via Gino Doria	Asfalto/Basoli
Via Aniello Falcone	Sanpietrini/Flessibile
Via R. Falvo	Flessibile
Via F. Fracanzano	Flessibile
Via V. Genito	Flessibile
Via Luca Giordano	Sanpietrini
Via Kagoshima	Sanpietrini
Via M. Kerbaker	Flessibile
Via Pirro Licorio	Flessibile
Via A. Longo	Flessibile
Via R. Lordi	Flessibile
Via A. Mancini	Flessibile
Via R. Morghen	Asfalto/Sanpietrini
Via P. Mascagni	Flessibile
Via Giovanni Merliani	Flessibile
Via F. P. Michetti	Sanpietrini
Via Mura	Flessibile
Via Paisiello	Flessibile
Via Filippo Palizzi	Flessibile
Via Parco Lamaro	Flessibile

---

Via Petrella	Flessibile
Via A. Pitloo	Flessibile
Via Mattia Preti	Flessibile
Via G. Puccini	Flessibile
Via G. Ribera	Flessibile
Via Ugo Ricci	Flessibile
Via Rossomandi	Asfalto/Sanpietrini
Via G. Rossini	Flessibile
Via S. Altamura	Flessibile
Via San Domenico	Flessibile
Via Luigia Sanfelice	Flessibile
Via San Gennaro Al Vomero	Flessibile
Via Santa Maria Della Libera	Flessibile
Via Torrione San Martino	Flessibile
Via Santo Stefano	Flessibile
Via A. Scarlatti	Sanpietrini
Via F. Solimena	Asfalto/Sanpietrini
Via M. Stazione	Flessibile
Via A. Tilgher	Flessibile
Via F. P. Tosti	Sanpietrini
Via A. Vaccaro	Flessibile
Via Zingarelli	Flessibile
Calata S. Francesco	Basoli
Corso Europa	Flessibile
Largo Martuscelli	Flessibile
Piazza Iv Giornate	Flessibile
Piazza Degli Artisti	Flessibile

---

Piazza Fanzago	Sanpietrini
Piazza F. Fuga	Sanpietrini
Piazza Vanvitelli	Sanpietrini
Piazzetta S. Gennaro Al Vomero	Sanpietrini
Viale Michelangelo	Basoli
Vico Acitillo	Asfalto/Basoli
Vico Belvedere	Basoli
Vicoletto Belvedere	Basoli
2° Viale Malatesta	Flessibile
V.Le Priv. Winspeare	Flessibile

---

## BIBLIOGRAFIA APPENDICE A

- [1] F. Benedetto, G. Giunta – *Teorema del Campionamento* – Nota per il corso di Telecomunicazioni – Web Document;
- [2] R. Mauro – *Elementi sulle funzioni aleatorie e sulle serie storiche per l'analisi della circolazione stradale in condizioni di flusso ininterrotto* – Quaderni del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, n.40, 1995;
- [3] AA.VV. – *Analisi Armonica* – Web Document;
- [4] J. S. Bendat, A. G. Piersol – *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*– Wiley-Interscience, 1971;
- [5] N. Wiener – *Generalized harmonic analysis* – Acta. Math., Stockh. 55, 117-258, 1930;
- [6] J. N. Rayner – *An Introduction to Spectral Analysis* – Pion Limited, 1971;
- [7] G. Diana, F. Cheli – *Dinamica e vibrazioni dei sistemi meccanici, Vol II* – UTET, 1996.